

ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS AUDIOVISUALES
Y MULTIMEDIA

CURSO ACADÉMICO 2023/2024

TRABAJO FIN DE GRADO

DESPLIEGUE DE REDES MÓVILES 5G EN
ESPAÑA: METODOLOGÍA Y CASO DE
ESTUDIO REAL

Autor: JOSE M. BONOKO BIJERI

Tutor: EDUARDO MARTÍNEZ DE RIOJA DEL NIDO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a la empresa Elecnor Servicios y Proyectos, la cual propulsó mi propia iniciativa de abordar el tema del que este trabajo trata. Gracias al personal por los conocimientos suministrados, en especial a Fernando. Por él, también me gustaría dar las gracias a Kiko, responsable de cobertura radio de Vodafone, por su tiempo y amabilidad.

Quiero agradecer a mi tutor Eduardo, su ayuda para poder estructurar las bases de este TFG y su atención. Su presencia ha sido también relevante y motivadora para la elaboración de este TFG.

También me gustaría dar las gracias a mis compañeros y amigos, sin ellos habría sido muchísimo más difícil encontrarme en la recta final de esta experiencia tan dura pero necesaria. Si algo hemos aprendido en estos años de carrera es a no rendirnos y cómo buscarnos la vida para sacar las cosas adelante y esto, sobre todo con trabajo en equipo, es muy posible. ¡Por algo estamos aquí!

A continuación, no podían faltar los agradecimientos a mi familia, mis padres y mi hermana. Sin los esfuerzos y sacrificios tan grandes de mis padres no sería la persona que soy hoy y posiblemente no estaría en la situación en la que estoy. Gracias a todos por aguantarme en los días de mayor estrés, porque no eran días fáciles.

Y, por último, pero no menos importante, quiero darme las gracias a mí. Quiero darme las gracias por creer en mí. Quiero darme las gracias por haber hecho este duro esfuerzo. Quiero darme las gracias por nunca pensar en dejarlo. Quiero darme las gracias por siempre dar e intentar dar más de lo que recibo. Quiero darme las gracias por intentar hacer más el bien que el mal. Simplemente, quiero darme las gracias por ser yo todo el tiempo.

Gracias.

*“Dreams without goals are just dreams, and ultimately they fuel disappointment.
On the road to achieving your dreams you must apply discipline,
but more importantly consistency.
Because without commitment you’ll never start,
but without consistency you’ll never finish”*

Denzel Washington

RESUMEN

En España, el despliegue de redes móviles 5G ha adquirido mucha importancia debido a su promesa de una conectividad más rápida y mejor. Esta tecnología ofrece velocidades ultra rápidas, menor latencia y capacidad para conectar múltiples dispositivos al mismo tiempo. En este Trabajo Fin de Grado, analizaremos los avances y desafíos que enfrenta España en el despliegue de redes móviles 5G, guiándonos por su metodología y aplicándola a un caso de estudio real.

Con la subasta del espectro radioeléctrico llevada a cabo por el gobierno, se les permitió a los operadores de telecomunicaciones adquirir las frecuencias necesarias para implementar redes 5G. Por lo tanto, los operadores de telecomunicaciones en España tienen que hacerse cargo de proporcionar todo lo necesario, como instalación de estaciones base 5G, determinados equipos, antenas y fibra óptica para mejorar la capacidad y la densidad de conexiones, con previa identificación de las áreas más adecuadas para el despliegue, basándose en la densidad de población, la demanda de servicios de datos y las zonas de mayor actividad económica.

El despliegue de redes móviles 5G en España ha seguido una metodología cuidadosa que involucra la identificación de áreas estratégicas, la planificación de infraestructura y la gestión eficiente del espectro. En este Trabajo Fin de Grado, se realiza un análisis detallado de las distintas fases del proceso de despliegue, así como de la normativa existente al respecto. Además, se presenta en este trabajo un caso de estudio realista de despliegue, simulando un área determinada de una ciudad española, donde se ha analizado el radio de cobertura de una estación base que cuenta con antenas 5G y el nivel de señal que se puede obtener a partir de dicha estación base. En base a este estudio, es posible determinar si un punto es apropiado para llevar a cabo el despliegue de red en dicho lugar.

SUMMARY

In Spain, the deployment of 5G mobile networks has gained significant importance due to its promise of faster and improved connectivity. This technology offers ultra-fast speeds, lower latency, and the ability to connect multiple devices simultaneously. In this Final Degree Project, we will analyze the progress and challenges that Spain faces in the deployment of 5G mobile networks, guided by its methodology and applying it to a real case study.

Through the spectrum auction conducted by the government, telecommunication operators were able to acquire the necessary frequencies to implement 5G networks. Therefore, telecommunication operators in Spain are responsible for providing everything needed, such as the installation of 5G base stations, specific equipment, antennas, and fiber optic infrastructure to enhance capacity and connection density. This is done after identifying the most suitable areas for deployment based on population density, demand for data services, and regions with high economic activity.

The deployment of 5G mobile networks in Spain has followed a careful methodology that involves the identification of strategic areas, infrastructure planning and efficient spectrum management. In this Final Degree Project, a detailed analysis of the different phases of the deployment process is carried out, as well as the existing regulations in this regard.

Furthermore, this work presents a realistic case study of deployment, simulating a specific area in a Spanish city, where the coverage radius of a base station that has 5G antennas and the signal level that can be obtained from said base station have been analyzed. Based on this study, it is possible to determine if a point is appropriate to carry out network deployment in that location.

ÍNDICE

1. Introducción	13
1.1. Objetivos del trabajo	13
1.2. Metodología y plan de trabajo	14
1.3. Estructura de la memoria	14
2. Marco teórico y estado del arte	16
2.1. Tecnología 5G	17
2.1.1. Distinción dentro de la propia tecnología: 5G NSA y 5G SA	18
2.1.2. El Internet de las Cosas	20
2.1.3. Riesgos de la tecnología 5G	22
2.1.4. Modificaciones en la TDT por la aparición del 5G	23
2.2. Arquitectura de red 5G	25
2.3. Redes 5G en España	29
3. Despliegue de una red 5G	36
3.1. Normativa	37
3.1.1. Ubicación	37
3.1.2. Niveles de operación y exposición	38
3.1.3. Seguridad	40
3.2. Equipos	42
3.2.1. Antenas	42
3.2.2. RRU	47
3.2.3. BBU	48
3.2.4. DCU	49
3.2.5. Boost Voltage	50
3.2.6. Mimetizado	50
3.2.7. Equipo de fuerza	52
3.2.8. Antenas GPS	53
3.3. Metodología del despliegue	54
3.3.1. Fases del despliegue	54
3.3.1.1. Etapas pre-swap	54
3.3.1.2. Swap	58

3.3.2. Fases de implementación	61
4. Caso de estudio real	62
4.1. Fases del despliegue sobre un escenario real	62
5. Ejemplos de uso de la red 5G	73
6. Conclusiones y líneas futuras	77
6.1. Conclusiones	77
6.2. Líneas futuras	78
7. Bibliografía	80
8. Anexos	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del 1G al 5G.....	16
Figura 2. Requisitos de la tecnología 5G.....	18
Figura 3. Elementos del estándar 5G NR.....	20
Figura 4. Representación del Internet de las Cosas.....	21
Figura 5. Esquema de nuevo rango de canales TDT.....	23
Figura 6. Filtro LTE 5G para antenas.....	24
Figura 7. Filtro LTE 5G para exteriores.....	24
Figura 8. Filtro LTE 5G para cabeceras.....	24
Figura 9. Filtro LTE 5G para interiores.....	25
Figura 10. Representación de la arquitectura de la red 5G.....	26
Figura 11. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 3,5 GHz.....	30
Figura 12. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 700 MHz.....	30
Figura 13. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 1,8GHz.....	31
Figura 14. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 2,1GHz.....	31
Figura 15. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 26GHz.....	32
Figura 16. Tabla de reparto de espectro radioeléctrico en España.....	32
Figura 17. Sistema radiante en la azotea de un edificio.....	36
Figura 18. Sistema radiante en lo alto de una torre tubular.....	37
Figura 19. Representación del diagrama de radiación de una antena omnidireccional.....	43
Figura 20. Representación del diagrama de radiación de antena directiva unidireccional...	43
Figura 21. Diagrama de radiación de una antena sectorial.....	44
Figura 22. Agrupación de antenas pasivas.....	44
Figura 23. Imágen de una antena activa 5G.....	45
Figura 24. Designación de azimut.....	46
Figura 25. Cálculo del tilt.....	46
Figura 26. Representación de la radiación de una antena directiva.....	47
Figura 27. Imagen de diferentes RRUs en una estación base.....	48
Figura 28. Estructura de las BBU según su modelo.....	49

Figura 29. Vista de una BBU5900 con tarjetería UBBP y UMPT insertada y fibras ópticas conectadas.....	49
Figura 30. Vista de 2 DCDU-12B alimentadas por 1 disyuntor de 100 A respectivamente...	50
Figura 31. Imagen de un Boost Voltage.....	50
Figura 32. Vallas publicitarias que albergan equipos del sistema radiante.....	51
Figura 33. Mimetizado SLIM en cuyo interior se encuentran las antenas.....	52
Figura 34. TP48400.....	52
Figura 35. Vista de equipos que alberga el TP48400.....	52
Figura 36. Imagen 1/2 de antena GPS.....	53
Figura 37. Imagen 2/2 de antena GPS.....	53
Figura 38. Mástil autosoportado.....	56
Figura 39. Torre tubular.....	57
Figura 40. Torre celosía.....	57
Figura 41. Etiquetado de fibras ópticas y alimentaciones.....	60
Figura 42. Instalación de sistema radiante.....	60
Figura 43. Vista en modo mapa de la estación base.....	63
Figura 44. Vista en modo satélite de la estación base.....	63
Figura 45. Propiedades de la Banda de frecuencias.....	64
Figura 46. Parámetros de radio.....	65
Figura 47. Parámetros 5G.....	66
Figura 48. Propiedades del método de cálculo.....	67
Figura 49. Rango de colores en representación del nivel de la señal 5G.....	69
Figura 50. Rango en el que se realiza el estudio.....	70
Figura 51. Niveles de potencia de la señal.....	70
Figura 52. Análisis de mejor servidor.....	71
Figura 53. Solapamiento.....	71
Figura 54. Impacto del 5G en coches autónomos.....	74
Figura 55. Evolución médica gracias al 5G.	75
Figura 56. El ojo de Dios.....	78
Figura 57. Características generales de antena 5G modelo AAU5639w.....	84

ACRÓNIMOS

- 1G (Primera generación).
- 2G (Segunda generación).
- 3G (Tercera generación).
- 3GPP (3rd Generation Partnership Project).
- 4G (Cuarta generación).
- 5G (Quinta generación).
- AAU (Active Antenna Unit)
- dB (Decibelios).
- DSS (Dynamic Spectrum Sharing).
- EMBB (Enhanced Mobile Broadband).
- EPC (Evolved Packet del 4G).
- FDD (Frequency-Division Duplexing).
- Gbps (Gigabits por segundo).
- IA (Inteligencia artificial).
- ICNIRP (International Commission for non-ionizing radiation Protection).
- IEC (International Electrotechnical Commission).
- IMT (International Mobile Telecommunications).
- IoT (Internet of Things).
- LTE (Long Term Evolution).
- M2M (machine to machine).
- Mbps (Megabits por segundo).
- MEC (Multi-Access Edge Computing).
- MHz (Megahercios).
- Millimeter wave o mmWave (ondas milimétricas).
- MIMO (Multiple Input, Multiple Output).
- ML (Machine Learning).
- MMTC (Massive Machine-Type Communications).
- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (microvatios por centímetro cuadrado).
- NFV (Network Function Virtualization).
- NGCN (Next Gen Core).
- NR (New Radio).
- NS (Network Slicing).
- NSA (Non-Standalone).
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).
- OMS (Organización Mundial de la Salud).
- PCS (Port Community System).
- QC (Quality Control).
- RD (Real Decreto).
- SA (Standalone).
- SAR (Specific Absorption Rate).

- SDN (Software Defined Networking).
- SMS (Short Message Service).
- TAE (Tasa de Absorción Específica).
- TDD (Time-Division Duplexing).
- TDT (Televisión Digital Terrestre).
- UE (Unión Europea).
- UHF (Ultra High Frequency).
- UIT o ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones o International Telecommunication Union).
- UPS (Uninterruptible Power Supply).
- URLLC (Ultra-High Reliability & Low Latency Communications).
- V/m (voltios por metro).
- W/kg (vatios por kilogramo).
- W/m² (vatios por metro cuadrado).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La elaboración de este Trabajo Fin de Grado (TFG) está motivada por la constante evolución tecnológica de la sociedad, que nos ofrece mayor rango de comunicación y facilidades con el paso de los años. Como ser curioso que es el ser humano por naturaleza, siempre encuentra la manera de superar sus grandes logros y descubrimientos mediante la continua puesta a prueba de las diferentes ideas que derivan de sus características innatas, tales como la capacidad de reflexión, y los conocimientos que va adquiriendo en el proceso de aprendizaje y en base a experiencias vividas.

En este contexto, destaca la aparición del 5G, es decir, la quinta generación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas. Se trata de una continuación y mejora del 4G (o estándar LTE, *Long Term Evolution*) que permite la conexión a la red de múltiples dispositivos. Además, favorece la velocidad de conexión y transmisión de datos, aumenta la capacidad del sistema y reduce significativamente la latencia, entre otras cosas.

Sin embargo, para poder disfrutar de esta mejora que supone el 5G en la red de telefonía móvil, habrá que desarrollar diferentes pautas de estudios, pruebas e instalaciones que posibiliten la propagación de esta tecnología. Estas pautas serán las que comprendan el proceso de despliegue que se detallará a lo largo de este trabajo.

1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es explicar el proceso de instalación y puesta en funcionamiento de los equipos que posibilitan la implantación de las redes móviles de Quinta Generación (5G), analizando un caso de estudio realista. Con ello se pretende dar una mayor visibilidad a la tecnología 5G, explicando su origen, sus características y las ventajas o inconvenientes que de él derivan.

Para lograr este objetivo general, se fijarán los siguientes objetivos específicos:

- Investigación sobre el surgimiento de las redes 5G.
- Argumentación sobre ventajas e inconvenientes de estas nuevas redes.
- Análisis de las distintas fases del despliegue de las redes 5G.
- Desarrollo de un estudio basado en el despliegue de las redes de Quinta Generación.
- Conclusiones finales obtenidas.

1.2. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Para la realización de este trabajo, se han combinado distintas metodologías. En primer lugar, se ha realizado una fase de formación y lectura de documentación técnica, en la que se han adquirido los conocimientos relativos a las redes 5G y su proceso de despliegue. Esta información ha sido obtenida de fuentes como artículos, blogs, foros, manuales, comunicaciones con personal del sector e incluso por conocimientos propios, entre otros. Gracias a estas fuentes se ha conseguido recopilar gran cantidad de información para que pueda ser estudiada, comprendida e interpretada por los usuarios. Esta información puede ser consultada desde el apartado de Bibliografía al final de este trabajo.

Como ampliación a estos conocimientos, se ha utilizado un software capaz de crear simulaciones de redes 5G utilizando escenarios reales en los que se puede introducir datos y obtener diferente información útil para su aplicación en la vida cotidiana. Para el correcto uso de este software también fue necesario aplicar un proceso de aprendizaje, mediante la consulta de sus manuales, guías y explicaciones de gente ya experimentada en su uso.

Finalmente, la última fase del trabajo ha consistido en el análisis crítico de los resultados obtenidos y la redacción de la memoria del TFG.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria se estructura en 6 capítulos. El primero de ellos es un capítulo introductorio donde se plantea el tema del TFG, los objetivos y la metodología seguida. El resto de los capítulos se organizan de la siguiente forma:

En el capítulo 2, comenzaremos con un retroceso en el tiempo, para explicar el proceso de evolución desde la primera red de comunicaciones, conocida como 1G, hasta la actual 5G, o segundo dividendo digital, que aparece como una revolución en la manera de comunicación y conexión a nivel global promovida por la necesidad de la búsqueda de continuo avance, en el cual se pretende profundizar. Con relación a ello, le sigue una explicación más detallada de esta tecnología en la que además se expondrán los posibles riesgos que pudiera causar la implementación de estas redes 5G, detalles de la arquitectura en la que se basan estas redes, los tipos de conexiones que nos ofrece, las características más relevantes y las frecuencias reservadas para su funcionamiento, principalmente en España.

En el capítulo 3, continuaremos con una explicación detallada del proceso de despliegue de redes móviles, argumentando la elección de emplazamiento, los tipos de equipos utilizados en el proceso de instalación, sus métodos y su activación final.

A continuación, en el capítulo 4, se expondrá un caso realista de despliegue, basándonos en la explicación de despliegue anterior, pero esta vez mostrando el proceso real que se está llevando a cabo actualmente en distintos emplazamientos de España.

En el capítulo 5, se enumeran una serie de ejemplos de uso actual de tecnología 5G, en la que también se da un punto de vista objetivo y se comentan las ventajas e inconvenientes de estos ejemplos.

Por último, en el capítulo 6, se argumentarán conclusiones y visión a futuro de la tecnología 5G, enfocando una visión más global en los diferentes usos y mejoras que pretende ofrecer.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Para hablar de la tecnología 5G, es necesario rememorar los inicios de esta gama de generaciones móviles que nos han proporcionado grandes avances y seguirán mejorando nuestra comunicación tecnológica [1][2][3].

Hace unos 40 años apareció la Red de comunicaciones móviles de primera generación (1G), centrada en los servicios de voz, pero con poca seguridad en la comunicación. Esta primera generación de comunicaciones móviles utilizaba señales analógicas para transmitir la voz. Unos años más tarde, en torno a los años 90, apareció el 2G, que mejoró la calidad y la seguridad en las comunicaciones, proporcionando además sistemas digitales con servicios de datos de baja velocidad, así como la posibilidad de enviar y recibir SMS's. Fue entonces cuando, junto con la entrada del nuevo milenio, llegó la verdadera irrupción del internet móvil gracias a la tecnología 3G. Éste fue un momento clave, ya que dio paso al intercambio de datos de audio y vídeo, imágenes y mensajes de texto, además del buzón de voz, gracias a un mejor aprovechamiento del ancho de banda (velocidades en torno a 2 Mbps). A partir de entonces, sólo se podía ir a mejor. La siguiente década (2010 en adelante) dio origen al 4G, el cual pasó de centrarse estrictamente en la innovación a obtener un enfoque más visual, proporcionando mejor calidad de imagen y velocidad en la transferencia de datos, gracias a la mejora en el ancho de banda. Esta fase es también conocida como dividendo digital y LTE (del inglés *"Long Term Evolution"*, Evolución de Larga Duración).

La red móvil de quinta generación (5G) es una de las innovaciones más importantes en el marco actual, dado que nos proporcionará mayor conectividad a la red y las personas, de ahí que se le conozca como el internet de las cosas (IoT, del inglés *"Internet of Things"*). Pretende obsequiarnos con mayor velocidad y una disminución considerable de la latencia, es decir, se reduce el retardo en la transmisión de datos. Se puede observar un resumen de la evolución de las redes de comunicaciones móviles en la Figura 1.



Figura 1. Evolución del 1G al 5G [1].

2.1. TECNOLOGÍA 5G

Observando el mundo tal y como lo conocemos hoy en día, podemos concretar que el principal objetivo que persigue el ser humano es la velocidad y la comodidad. Para ello, nos apoyamos en la tecnología y sus continuos avances para obtener mejor calidad de vida y con mayores facilidades, en la menor cantidad de tiempo posible.

Bajo este contexto, con el lanzamiento del 4G y tras el estreno en 2008 del programa surcoreano “5G mobile communication systems based on beam-division multiple access and relays with group cooperation” la tecnología 5G fue promovida y puesta bajo investigación para su posterior desarrollo ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) desempeña una función rectora en la gestión del espectro radioeléctrico y en la elaboración de normas de aplicación mundial para las IMT-2020 (International Mobile Telecommunications). Sus actividades sirven de base para el desarrollo y la aplicación de normas y reglamentos internacionales destinados a garantizar que las redes 5G sean seguras e interoperables y funcionen sin causar interferencia perjudicial a servicios adyacentes o recibirla de los mismos.

- Anteriormente la TDT utilizaba la banda de frecuencia que va de los 470 MHz a los 790 MHz, mientras que el 5G utilizaba la de 3700 MHz. Desde junio de 2020, la TDT pasó a comprender la banda de frecuencias de 470 a 694 MHz, con lo que la banda de frecuencias de 700 MHz fue liberada para ser ocupada por esta nueva tecnología 5G. Estos cambios en los canales de radiofrecuencia utilizados por la televisión actual responden a la decisión tomada por el Parlamento Europeo de situar la telefonía 5G en la banda de los 700 MHz para todos los países europeos, ya que las frecuencias más bajas permiten mayor penetración de la señal y, por tanto, más alcance y cobertura

A razón de proporcionar un avance, la tecnología 5G está impulsada por 8 requisitos específicos (ver Figura 2):

- Tasa de datos de hasta 10 Gbps.
- Latencia de 1 ms.
- Banda ancha 1000 veces más rápida.
- Hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (en comparación con las redes 4G LTE)
- Disponibilidad del 99.999%
- Cobertura del 100%
- Consumo de energía de la red 90% menor.
- Hasta 10 diez años de duración de la batería en los dispositivos IoT (Internet de las Cosas) de baja potencia



Figura 2. Requisitos de la tecnología 5G [4].

2.1.1. Distinción dentro de la propia tecnología: 5G NSA Y 5G SA

La importancia de la velocidad en la transmisión de datos es una de las claves y características más significativas de la tecnología 5G. Este proceso es posible gracias al uso de bandas de frecuencias mucho mayores que las de las generaciones predecesoras (30 GHz - 300 GHz), ya que al aumentar la frecuencia aumenta también el ancho de banda disponible. Para alcanzar el objetivo de latencia de 1 ms, las redes 5G implican conectividad para la estación base utilizando fibras ópticas [5].

La tecnología 5G también mejora las experiencias digitales gracias a la automatización con aprendizaje automático. La demanda de tiempos de respuesta en fracciones de segundo (como las de los automóviles con piloto automático) requiere que las redes 5G utilicen la automatización con ML (Machine Learning) y, eventualmente, Aprendizaje Profundo e Inteligencia Artificial (IA).

El aprovisionamiento automatizado y la administración proactiva del tráfico y los servicios reducirá el coste de infraestructura y mejorará la experiencia conectada.

De esta manera, la implantación del 5G conlleva dos fases [6]:

- Una fase inicial, la Release 15 3GPP (3rd Generation Partnership Project: Proyecto Asociación de Tercera Generación) o más conocido como 5G NSA (5G Non-Standalone, 5G no autónomo), que se apoya en la tecnología 4G para ofrecer servicios básicos de conectividad. Es la que está ocupando actualmente la gran parte de emplazamientos en España, bajo la imposición de operadores de primer nivel como Vodafone, Orange o Telefónica.
- La segunda fase, Release 16 o 5G SA (5G Standalone, 5G completo), que requiere de gran cantidad de hardware nuevo. Ofrece la totalidad de funcionalidades de esta tecnología. Además, es la tecnología que otorgará protagonismo al espectro de ondas milimétricas (millimeter wave o mmWave), que hace referencia a las frecuencias que se encuentran entre los 24 y los 100 GHz, sostenidas por torres con menos alcance y con

celdas de menor tamaño, lo que implica mayores costes y esfuerzos en el desarrollo y despliegue, aunque ofrecerá conexiones más estables en núcleos de población densos.

Ambas fases son consideradas por la 3GPP cómo estándares 5G, pero todas las ventajas del 5G completo no llegarán hasta la implementación y puesta a punto definitivamente del 5G SA. Su comercialización, que implica un nuevo despliegue de antenas más denso que el utilizado para las redes 4G, ya es una realidad en muchos países, pero no en todas las zonas está realmente operativa. Mientras que la infraestructura del 5G NSA se implementa manteniendo el núcleo de red Evolved Packet del 4G (EPC) y la parte de radio evoluciona de LTE a New Radio (NR), con el 5G SA, tanto la parte radio como la parte core son Next Radio (NR) y Next Gen Core (NGCN). Ambas fases, 5G NSA y 5G SA, utilizan el espectro radioeléctrico destinado para el 5G y tienen las siguientes características:

- 5G NSA:
 - Velocidad mejorada hasta los 2 Gbps.
 - Latencia que cae hasta los 10 ms.
 - Mayor estabilidad y fiabilidad en la conexión, incluso en movilidad o en aglomeraciones, gracias a tecnologías como Massive MIMO.
 - Capacidad de red mucho mayor.

- 5G SA (5G completo):
 - Transferencia de datos de mayor velocidad, alcanzando hasta los 10 Gbps, permitiendo así la descarga ultrarrápida de contenidos, el video en streaming de muy alta calidad o la indefinida conexión de los dispositivos móviles a la red.
 - Mejora de la latencia, que se reduce a en torno a 1 ms. Esta condición podría hacerlas apropiadas para aplicaciones que tienen requerimientos específicos en este ámbito, como el vehículo autónomo, servicios de telemedicina o sistemas de seguridad entre otros.
 - Mayor ancho de banda.
 - Mayor conectividad simultánea sin pérdida de velocidad.
 - Reducción del consumo de la red

En relación con lo anterior, cabe destacar el desarrollo del nuevo estándar New Radio (NR) para la red de acceso radio [7]:

La denominación 5G NR hace referencia al nuevo estándar inalámbrico basado en la OFDM que sustituirá a la tecnología LTE como el estándar de facto para la tecnología 5G (ver Figura 8). El proyecto 3GPP lanzó el estándar NR preliminar en diciembre de 2017. El espectro NR incluye frecuencias de menos de 6 GHz hasta 100 GHz. Gran parte de este amplio espectro consiste en el espacio que ha quedado libre al retirar las tecnologías 2G y 3G, y las bandas de frecuencias de PCS (del inglés, Port Community System) para la banda de menos de 6 GHz. El diseño central de 5G NR abarca tres elementos fundamentales:

- Formas de onda optimizadas basadas en OFDM (del inglés, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y acceso múltiple para ofrecer un alto rendimiento a baja complejidad.
- Un marco flexible común para permitir la multiplexación eficiente de diversos servicios 5G.
- Tecnologías inalámbricas avanzadas para la mejora del rendimiento y eficiencia de los servicios 5G. Encontramos aquí tres designaciones destacadas de estos servicios, siendo

éstas la banda ancha móvil mejorada (eMBB), las comunicaciones ultra fiables y de baja latencia (uRLLC) o Control de Misión Crítica y, por último, las comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC).

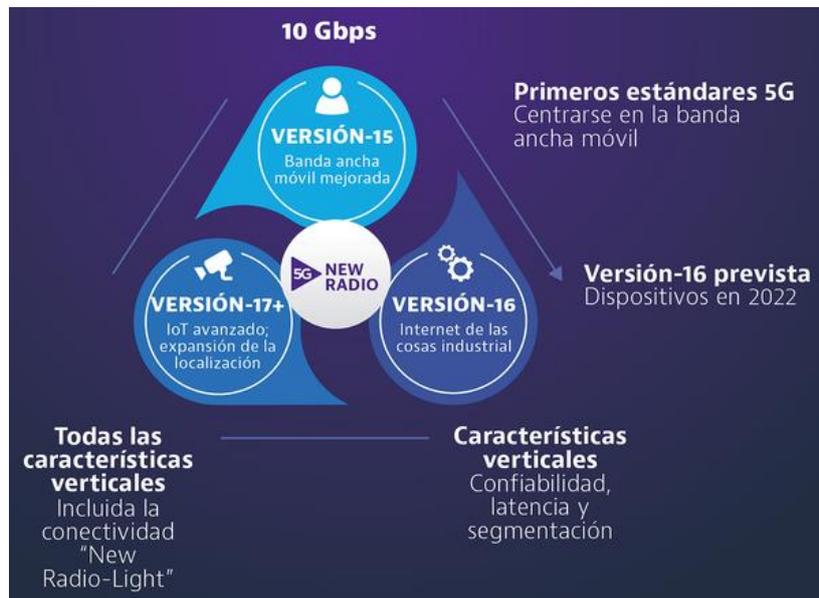


Figura 3. Elementos del estándar 5G NR [7].

La primera aplicación que se debía abordar y estandarizar era la banda ancha móvil. Más adelante, vendrá el turno de las comunicaciones masivas entre máquinas y las comunicaciones de latencia baja ultra confiable (Figura 3).

2.1.2. El Internet de las Cosas

La intención inicial era que para finales de 2022 estuviese totalmente operativa y puesta en funcionamiento la red 5G SA a nivel mundial. Sin embargo, la irrupción del COVID-19 propició el retraso del despliegue en gran parte de la población mundial, aunque no resultó un inconveniente para todos los países. Grandes potencias como China o EE.UU aprovecharon el confinamiento para realizar un considerable despliegue de antenas en sus respectivas regiones. Aun así, se ha conseguido acelerar el proceso con respecto a las consecuencias reales que se esperaba que esta pandemia desencadenase en términos de despliegue y actualmente se está dando mayor funcionalidad al 5G SA, aunque, evidentemente, no a la magnitud que se estimaba en la época anterior a la pandemia. De hecho, se ha avanzado el despliegue de redes 5G en muchos países, aunque en Occidente la mayoría de los operadores esperan a que crezca más la demanda de servicios 5G mientras que se hace uso del 5G NSA, lo que implica menor inversión.

Como consecuencia, lo más esperado tiene que ver con la conectividad masiva por primera vez de dispositivos autónomos, diseñados para emitir datos, recibirlos convertidos en información y operar en función de estos últimos, lo que ya se conoce como Internet de las Cosas (IoT, del inglés "Internet of Things"). Esta innovación tecnológica tiene el potencial de revolucionar los procesos y las aplicaciones de la industria moderna e incluso de la agricultura, de la manufactura y del negocio de las comunicaciones. Será la aportación particular de 5G, pues las máquinas no pueden funcionar a estos niveles más que por medio de sensores idealmente incorporados a elementos en movimiento o bien en entornos en los que no cabe la instalación de una conexión

inalámbrica y donde las redes de banda ancha sin hilos no son viables, por su dimensión o riesgos de interferencias.

La nueva realidad que nos aborda implica la conexión a internet garantizada en cada dispositivo y, con ello, a otros objetos con los que éste podrá comunicarse. Esta comunicación se llevará a cabo a través de diversos medios como WiFi, bluetooth o el propio 5G.

Esta tendencia del Internet de las Cosas también implica la comunicación machine to machine (M2M). Podemos asegurar que las conexiones a internet serán cada vez más frecuentes entre máquinas, haciendo posible que millones de chips comuniquen los datos que registren. Se estima que el número de dispositivos conectados a IoT seguirá aumentando en los próximos años hasta alcanzar los 66.000 millones de unidades en el año 2026.

Así mismo, cabe destacar los sectores a los que el Internet de las Cosas aportará mayor volumen de negocio: los principales son los de la construcción (centrada en los denominados edificios inteligentes, cuyo principal objetivo será el de aportar más seguridad y privacidad, permitiendo que los elementos de nuestro hogar nos notifiquen sobre cualquier incidente o necesidad) y la automoción (el negocio de los coches conectados, tales como los coches de conducción automática). Como añadido, encontraremos más innovaciones dentro del sector “utilities” o de servicios públicos, las “smart cities” o ciudades inteligentes, y la industria. Con la alta tasa de adopción de dispositivos y sensores conectados y la habilitación de la comunicación M2M, ha habido un aumento en los puntos de datos que se generan en la industria manufacturera.

Retrocediendo unos años atrás en el tiempo, todas estas ideas nos parecerían objeto de fantasía, un producto de nuestra imaginación creado para idealizar una realidad diferente a la vivida en aquel entonces. Hoy en día, el Internet de las Cosas (ver Figura 4), junto con la inteligencia artificial está haciendo posible lo imposible. A medida que la tecnología evoluciona, llegan a nuestras vidas y hogares elementos cada vez más modernizados e impresionantes.



Figura 4. Representación del Internet de las Cosas.

2.1.3. Riesgos de la tecnología 5G

Muchas han sido las especulaciones sobre los riesgos que la introducción de esta nueva tecnología, al igual que las anteriores, podría desencadenar, siendo más destacado el cáncer por radiación [8].

Los teléfonos móviles emiten radiación por radiofrecuencia dentro del espectro electromagnético. Los teléfonos y aparatos de segunda, tercera y cuarta generación (2G, 3G y 4G) usan frecuencias de entre 0,7 y 2,7 GHz, mientras que los de quinta generación (5G) usarán frecuencias de hasta 80 GHz. Estas frecuencias corresponden a la amplitud del espectro no ionizante. Este tipo de radiación es de baja energía y no tiene suficiente energía como para eliminar un electrón (partícula negativa) de un átomo o molécula, por lo que no daña el ácido desoxirribonucleico (ADN), y en ella se incluye la luz visible, infrarroja y ultravioleta, las microondas, las ondas de radio y la energía de radiofrecuencia de los teléfonos móviles. En cambio, la radiación ionizante es de alta frecuencia y energía, por lo que podría eliminar un electrón de un átomo o molécula y causar su ionización, y puede surgir de fuentes como los rayos X, el radón y los rayos cósmicos. La energía de la radiación ionizante puede causar cambios en los genes que aumentan el riesgo de cáncer. Esto quiere decir que la alta y continua exposición a la energía de radiación ionizante puede afectar directamente al ADN, provocando alteraciones en el mismo que en su evolución podrían provocar daños inmediatos en el cuerpo, que incluyen daños graves en la piel o los tejidos, enfermedad aguda por radiación y muerte.

Durante la evolución en las generaciones de telefonía móvil, se han estado llevando a cabo investigaciones relacionadas con los posibles riesgos que las redes inalámbricas puedan ocasionar en nuestra salud. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó en 2006 un artículo científico, conocido como *“Los campos electromagnéticos y la salud pública: estaciones de base y tecnologías inalámbricas”*, en el que se estudian los posibles casos que pudiesen propiciar la aparición de efectos y daños perjudiciales para la salud. A partir de entonces, las investigaciones han sido constantes. Así fue como, en su momento, la OMS declaró las tecnologías inalámbricas como cancerígeno de nivel 2B, de baja probabilidad cancerígena como el café, los pepinillos, el vinagre o el aloe vera.

Llegó el año 2020, y con ello la OMS publicó un nuevo artículo, esta vez refiriéndose a la incidencia de la tecnología 5G en la salud de las personas, solo que para aquel entonces su implementación no seguía un camino tan avanzado como se esperaba y afirmaron que se seguirían haciendo evaluaciones de riesgos para la salud por exposición a radiofrecuencias, con la intención de realizar su publicación en 2022. Mientras se desarrolla este proceso, su postura se posiciona en la convicción de que no se ha detectado ningún efecto negativo saludable por exposición a las tecnologías inalámbricas. Uno de sus testimonios afirma que la exposición a los campos de radiofrecuencia con las tecnologías existentes aumenta de manera desestimada la temperatura de los tejidos corporales de los seres humanos, pero al aumentar la frecuencia la incidencia en los tejidos es menor y la energía se concentra más en la superficie, como en la piel, y al mantener los niveles de exposición total por debajo de los límites internacionales, no se considera un efecto peligroso para la salud. En este contexto, cabe destacar los efectos que se producirían en caso de superar estos límites de exposición, hecho que se espera que anuncie la OMS en su futura publicación.

En ese mismo año 2020, un comité independiente financiado por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones, el Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud, publicó un documento denominado “5G y salud”, cuyo veredicto fue, al igual que el de la OMS, la negativa a la creencia de incidencias negativas en la salud humana por respaldo de diversas investigaciones.

Sin embargo, siguen existiendo muchas entidades y plataformas decididas a establecer que hay insuficientes pruebas para negar los riesgos del despliegue del 5G e instan a frenar su implantación hasta obtener mayor veracidad.

Mientras tanto, se mantiene el optimismo con el futuro uso de frecuencias un poco más altas para el 5G, las conocidas como ondas milimétricas o *millimeter-wave* (mmWave), ya que emitirán ondas más dirigidas a los dispositivos desde la estación base, en lugar de realizar una emisión más dispersa como se produce con las frecuencias más bajas o las generaciones de red anteriores. Estas frecuencias más altas seguirán encontrándose comprendidas en el rango de frecuencias que constituyen el tipo de radiación no ionizante.

En conclusión, a expensas de un veredicto, los datos son más favorables a la postura de la fiabilidad de la nueva tecnología y, de confirmarse, la evolución tecnológica que nos depara el futuro próximo se presenta bastante optimista.

2.1.4 Modificaciones en la TDT por la aparición del 5G.

Como se comentaba al comienzo del apartado 2.1, la TDT pasó a comprender la banda de frecuencias de 470 a 694 MHz, con lo que la banda de frecuencias de 700 MHz fue liberada para ser ocupada por la tecnología 5G para todos los países europeos. Este hecho modificó el número de canales destinados a la TDT, quedando como se muestra en la Figura 5 [9]:

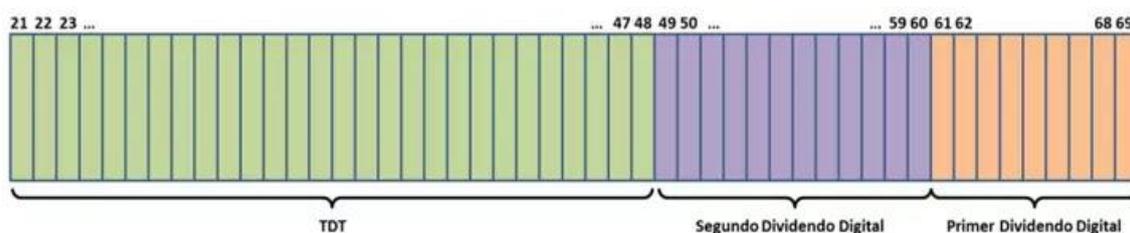


Figura 5. Esquema de nuevo rango de canales TDT [9].

De esta manera, apareció la entidad gestora conocida como Llega 700s, que se encargará de solucionar cualquier afectación que suceda en la recepción de la TDT para asegurar la continuidad del servicio de TV. Por otro lado, esta entidad afirma que no afecta a los ciudadanos que reciban la señal de televisión a través de cable/fibra óptica, satélite o internet.

Así mismo, aun habiendo diversas opciones, la solución más factible al problema que pueda causar el 5G al espectro radioeléctrico, como ya se hizo con el 4G, es la de aplicar filtros LTE, es decir, filtros paso bajo que producen cortes en un número de canal determinado y atenúan hasta 25dB las señales no deseadas para eliminar las interferencias. Dependiendo del formato y el lugar de instalación, encontraremos los siguientes modelos de filtros [10]:

- Filtros 5G para antenas: en esta sección encontramos tanto los filtros de dipolo pasivo, como los filtros de dipolo activo. Son los más recomendables al centrarse en el principal foco de captación de señales interferentes. Véase la Figura 6:

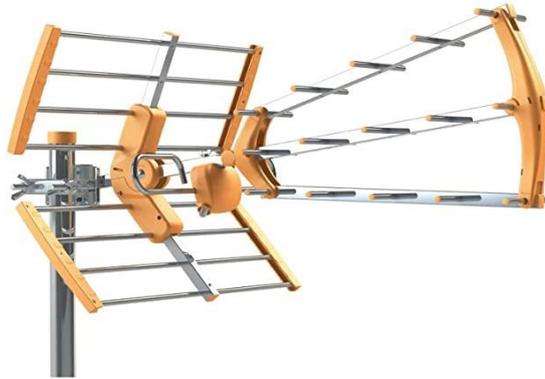


Figura 6. Filtro LTE 5G para antenas.

- Filtros 5G para exteriores: su instalación se realiza a continuación de la antena y antes del amplificador de mástil. Vemos un ejemplo de este filtro en la Figura 7:



Figura 7. Filtro LTE 5G para exteriores.

- Filtros 5G para cabeceras: filtran en las cabeceras de banda ancha las interferencias en los procesos de amplificación antes de la distribución a toma. Véase la Figura 8:



Figura 8. Filtro LTE 5G para cabeceras.

- Filtros 5G para interiores: conectando un buen filtro, como el de la Figura 9, garantizan mínima posibilidad de que las señales no deseadas lleguen a los televisores, receptores y resto de elementos finales.



Figura 9. Filtro LTE 5G de interior.

La instalación de estos filtros solo será conveniente en instalaciones ya existentes, puesto que las nuevas instalaciones incorporarán una adecuada configuración para la correcta recepción de la señal.

2.2. ARQUITECTURA 5G

Las arquitecturas 5G son plataformas definidas por software, más conocidas como SDN (del inglés Software Defined Networking, red definida por software), donde la funcionalidad de la red se administra a través de software en lugar de hacerlo a través de hardware. Los avances en cuanto a virtualización, tecnologías basadas en la nube y automatización de procesos de TI y comerciales permiten que la arquitectura 5G sea ágil y flexible y ofrezca acceso al usuario en cualquier momento y lugar. Las redes 5G pueden crear estructuras de subred definidas por software, conocidas como segmentos de red. Estos segmentos permiten que los administradores de red determinen la funcionalidad de la red de acuerdo con los usuarios y los dispositivos [11][12].

La arquitectura de una red de telefonía móvil está dividida en dos partes diferenciadas, como se ve en la Figura 10 [13]:

1. Red de Acceso o Access Network: es la parte de la red que conecta a los usuarios finales (dispositivos móviles) con la red central del operador, es decir, la parte de la infraestructura que hace posible la conexión aérea, por ondas radio, entre los dispositivos móviles y la red del operador.
2. Red Core o Core Network: es la parte central de la red de un operador de telecomunicaciones que contiene las funciones de red, gestionando todas las funcionalidades y servicios del operador.

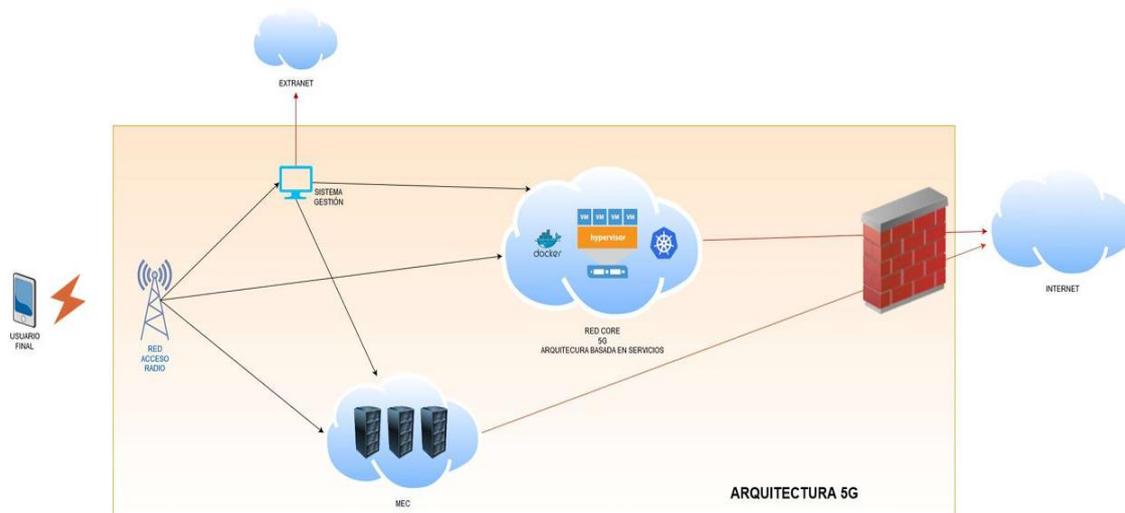


Figura 10. Representación de la arquitectura de la red 5G [13].

La revolución llega de la mano de esta tecnología 5G observándola desde el punto de vista de las características que propician un cambio de paradigma en la concepción de las redes de comunicaciones móviles, siendo estas características la virtualización, el *edge computing*, y localización; además de cambios importantes en las estrategias de seguridad.

Los cambios en el núcleo de red se encuentran entre las numerosas modificaciones arquitectónicas que van de la mano del paso de la tecnología 4G a la tecnología 5G, lo que incluye la migración a las ondas milimétricas, la tecnología MIMO masiva, la segmentación de las redes y, básicamente, cualquier otro elemento del diverso ecosistema 5G. A continuación, se realiza un análisis de las modificaciones en la arquitectura nombradas anteriormente:

- **Espectro y frecuencia con la tecnología 5G**

Como se comentó previamente, la parte del espectro de radio con frecuencias entre 30 GHz y 300 GHz se conoce ahora como onda milimétrica, dado que las longitudes de onda están comprendidas entre 1 y 10 mm. Además, las frecuencias UHF en desuso comprendidas entre 300 MHz y 3 GHz se están readaptando para la tecnología 5G. Así, las frecuencias de onda milimétrica tendrán uso en zonas con una alta densidad de población, aprovechando el mayor ancho de banda que ofrecen, mientras que para comunicaciones a larga distancia o en celdas de mayor tamaño se utilizarán en este caso las frecuencias más bajas.

- **MEC**

La informática perimetral multiacceso (MEC, del inglés Multi-Access Edge Computing) es un elemento importante de la arquitectura 5G. La MEC supone una evolución en la informática basada en la nube por la que se trasladan las aplicaciones de centros de datos centralizados al perímetro de la red y, por lo tanto, más cerca de los usuarios finales y sus dispositivos. Por consiguiente, será necesario un acuerdo entre operadores de la red y gestores de servicios para que pueda existir un flujo de información y servicios entre diferentes ubicaciones, en puntos cercanos al usuario final y dentro de la red de telefonía móvil de un operador de telecomunicaciones, en principio sin necesidad de estar en Internet. Al realizar las tareas de computación lo más cerca posible del usuario final, 5G permitirá una reducción en la latencia de las comunicaciones tal que permitirá contar con capacidades próximas al tiempo real.

- **NFV**

La virtualización de funciones de red (NFV, del inglés Network Function Virtualization) separa el software del hardware sustituyendo diversas funciones de red, como los cortafuegos, los equilibradores de carga y los enrutadores, por instancias virtualizadas ejecutadas como software, y manteniendo las funciones sin cambios. La virtualización consiste en hacer un uso completo del bajo coste y la flexibilidad de los recursos de los equipos de TI, pero no todas las funciones de red deben virtualizarse.

- **Segmentación de redes**

La virtualización de dispositivos incluye la tecnología de segmentación de redes (NS, del inglés Network Slicing) que permite que varias redes virtuales funcionen a la vez sobre una infraestructura de red física compartida. Forma parte de la arquitectura de la tecnología 5G al crear redes virtuales de extremo a extremo que incluyen tanto funciones de red como de almacenamiento.

- **Conformación de haces**

La implementación de la conformación de haces (Beamforming en inglés) es un sistema de señalización de tráfico para estaciones base celulares que identifica la ruta de entrega de datos más eficiente para un usuario en particular, y reduce la interferencia para los usuarios cercanos en el proceso. Gracias a la tecnología MIMO (del inglés Multiple Input, Multiple Output [múltiple entrada, múltiple salida]), en estaciones base dispuestas con docenas o cientos de antenas individuales, se puede reducir la interferencia mientras se transmite más información desde muchas más antenas a la vez. En las estaciones base MIMO masivas, los algoritmos de procesamiento de señales trazan la mejor ruta de transmisión a través del aire a cada usuario, a la vez que se pueden enviar paquetes de datos individuales en muchas direcciones diferentes, rebotándolos en objetos con precisión. Al coreografiar los movimientos de los paquetes y la hora de llegada, la formación de haces permite a muchos usuarios y antenas en una matriz MIMO masiva intercambiar mucha más información a la vez.

Uniendo los conceptos SDN y NFV, se pueden diferenciar tres nubes en la arquitectura de red 5G:

- La nube de acceso inalámbrico, que admite la separación de control y portador y la gestión colaborativa de los recursos de acceso para cumplir con varios escenarios de implementación futuros.
- La nube de control, que realiza la función de control de red centralizada, la función del elemento de red tiene virtualización, software y su reconfiguración, y admite la apertura de capacidades de red de terceros.
- La nube de reenvío, que separa la función de control, cierra la función de reenvío a cada estación base e integra diferentes capacidades comerciales con capacidades de reenvío.

La función de control de red se dividirá según el área física, es decir, según área local, regional y global. Como añadido, esta función de control se implementará en el centro de datos y realizará la gestión de movilidad, la gestión de sesiones y el control de recursos, a través de la interfaz en dirección norte y direccionamiento de enrutamiento.

El nuevo núcleo de red 5G, según se define en el 3GPP, utiliza una arquitectura basada en servicios (SBA) alineada con la nube que agrupa todas las interacciones y las funciones de la

tecnología 5G, incluidas la autenticación, la seguridad, la gestión de sesiones y la adición de tráfico de dispositivos finales. Este nuevo núcleo realza más la NFV como concepto de diseño integral, con funciones de software virtualizadas capaces de implementarse mediante la infraestructura de MEC que resulta esencial en los principios de la arquitectura de la tecnología 5G. Además, cabe destacar la transición gradual de las opciones arquitectónicas de la tecnología 5G del modo no independiente al modo independiente. El estándar de la tecnología 5G NSA emplea las redes centrales y RAN LTE existentes como medio de anclaje, con la adición de una portadora componente 5G. Por el contrario, el 5G SA implementa esta tecnología desde cero con la nueva arquitectura del núcleo de red y la implementación completa de todos los componentes de hardware, características y funciones correspondientes.

En general, SDN es la clave para conectar la nube de control y la nube de reenvío, pues la explotación del software es una infraestructura basada en una plataforma de computación en la nube. NFV reemplaza el equipo de la nube de reenvío y los elementos de red en múltiples nubes de control con equipos comunes para ahorrar costos. La programación de recursos, la expansión elástica y la gestión automatizada en tres nubes dependen de las plataformas de computación en la nube.

NFV es responsable de que los elementos de la red virtual formen "puntos", SDN es responsable de las conexiones de red para formar "líneas", y todas estas conexiones de red se implementan en una plataforma de nube virtualizada, y la computación en nube forma un "plano".

Desde el punto de vista de la seguridad, la especificación de la tecnología 5G incorpora importantes mejoras en las medidas de seguridad respecto a las generaciones anteriores, tanto en la red de acceso como en la red core. Nos encontramos con los siguientes:

- Modernización de la estructura de los identificadores de usuario permanentes y, además, cifrados para evitar que pueda transmitirse en claro vía radio.
- Actualización del proceso de autenticación con la llegada de 5G-AKA (Authentication and Key Agreement), donde tanto la autenticación del usuario como la de la red de conexión (red de servicio) la realiza la red del operador con la que se contrata el servicio (red home).
- Datos de usuario protegidos en integridad en la interfaz de radio.
- Posibilitar el acceso desde redes no 3GPP.
- Cifrado TLS de las comunicaciones entre funciones de red dentro de la red core.
- Opciones de trazabilidad que facilitan el registro de las operaciones para auditar la seguridad de la red.

Aunque la mejora de seguridad varía según el operador con el que se aplique el despliegue de la tecnología 5G, los avances esperados en el ámbito de la seguridad se presentan prometedores.

2.3. REDES 5G EN ESPAÑA

En territorio español, seis años después del encendido de las redes 4G, se dio la bienvenida oficial a la primera red 5G disponible comercialmente de la mano de Vodafone, que se puso en funcionamiento a finales de 2019 para sus clientes residentes en alguna de las 15 ciudades donde se realizaron despliegues en aquel momento [14]. Vodafone hizo esto de manera gratuita para los clientes de sus tarifas de contrato. El despliegue inicial se realizó utilizando el espectro disponible en la banda de 3,5 GHz y cubriendo inicialmente el 50% de ciudades como Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Málaga, Zaragoza, Bilbao, Vitoria, San Sebastián, Coruña, Vigo, Gijón, Pamplona, Logroño y Santander.

Más tarde, en 2020, Movistar anunciaba la activación de sus redes 5G confirmando que, antes de finalizar el año, el 75% de la población tendría cobertura.

Por último, fueron Orange y el grupo MásMóvil a través de Yoigo, pero usando la red de Orange, las operadoras que comenzaron a ofrecer 5G a sus clientes.

Tras el retraso sufrido por los diversos efectos de la pandemia por COVID en 2020, se pudo concretar satisfactoriamente la subasta del espectro en la banda de 700 MHz. Con la ausencia del Grupo MásMóvil de la subasta, fueron Telefónica, Vodafone y Orange quienes se repartieron equitativamente el espectro disponible.

De las 63 bandas que puede utilizar el estándar 5G NR, pocas son las disponibles actualmente en España, dado que las restantes están siendo aprovechadas por generaciones anteriores de telefonía móvil o no se asignaron a ningún operador. Por otra parte, los fabricantes de móviles eligen las bandas que consideran más convenientes según el mercado al que van destinados, así que deberíamos comprobar en sus especificaciones que aparecen reflejadas las bandas que utiliza el 5G en España [15][16]. Estas son las siguientes:

➤ 3,5 GHz – banda n78: banda principal de alta velocidad.

Banda principal para 5G en la que todas las operadoras tienen fragmentos de frecuencias atribuidos. Anteriormente, existía el inconveniente de que no podían ofrecer las características más óptimas de la tecnología porque los fragmentos de frecuencias estaban fraccionados y desordenados. Este hecho se producía por la antigua asignación de frecuencias a operadoras anteriores a las que disponemos actualmente. Como añadido, en esta banda el Ministerio de Defensa usaba 40 MHz, divididos en 2 bloques de 20 MHz, para servicios de radiolocalización. La evolución final, como podemos observar en la Figura 11, nos sitúa en un acuerdo entre operadoras en las que sus bloques utilizan frecuencias contiguas donde Vodafone dispone de un rango de frecuencias contiguo de 90 MHz en la parte alta (banda de 3,7 GHz, MásMóvil cuenta con 80 MHz, Orange añade 10 MHz de los 20 de Defensa subastados, situándose con 110 MHz, y Movistar cuenta finalmente con 100 MHz contiguos, aunque hay zonas en las que no podrá usar más de 80 MHz por el funcionamiento de radares de Defensa hasta 2023.

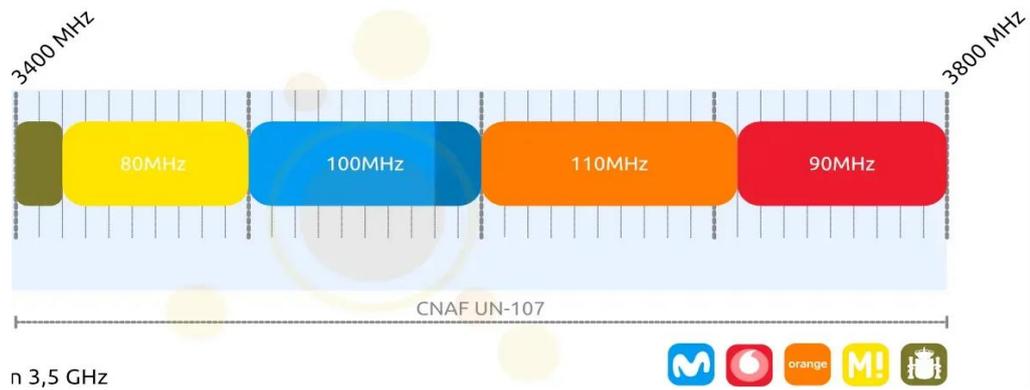


Figura 11. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 3,5 GHz.

- 700 MHz – banda n28: banda secundaria para reforzar cobertura.
De los bloques subastados, Movistar se hizo con el bloque de 2x10 MHz más barato, lo que le implica realizar un despliegue más acelerado, teniendo que ofrecer 5G antes de junio de 2025 a todos los municipios de más de 20.000 habitantes, los aeropuertos, puertos y estaciones del AVE, así como las autopistas, autovías y carreteras multicarril. Los compromisos de despliegue para Orange (dos bloques de 2x5 MHz) y Vodafone (un bloque de 2x10 MHz) no son tan exigentes, ya que sólo están obligados a ofrecer 5G en todas las poblaciones de 50.000 habitantes en 2025, aunque esto conllevó más inversión para ambos que su competidor, 350 millones de euros cada uno, 40 millones más que Movistar. Los tres bloques disponibles de 5 MHz en sentido descendente quedaron sin asignar por la ausencia de pujas (Figura 12).

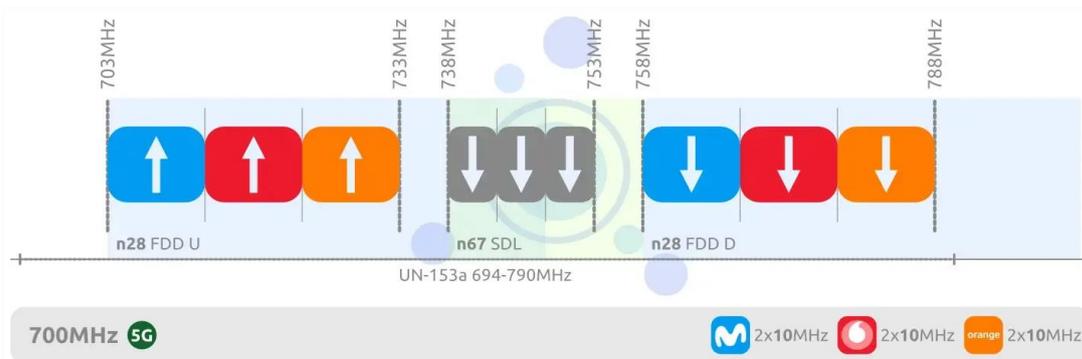


Figura 12. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 700 MHz.

- 1,8 GHz – banda n1: utilizadas para DSS (del inglés Dynamic Spectrum Sharing, o Compartición Dinámica del Espectro).
La red trata de 5G DSS compartiendo frecuencias con el 4G (Figura 13).

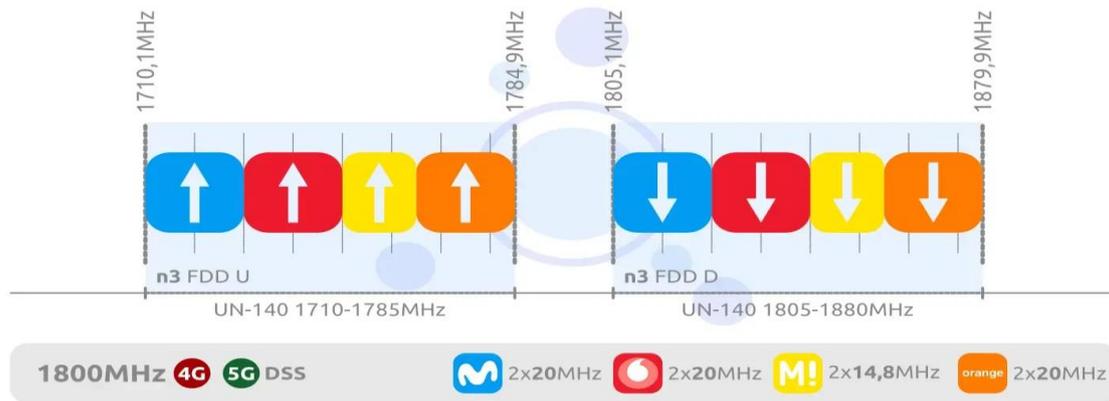


Figura 13. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 1,8GHz.

- 2,1 GHz – banda n3: utilizadas para DSS.
Banda más utilizada. Al igual que en la banda de 1,8GHz, la mayor parte de su despliegue trata de 5G DSS compartiendo frecuencias con el 4G (Figura 14).

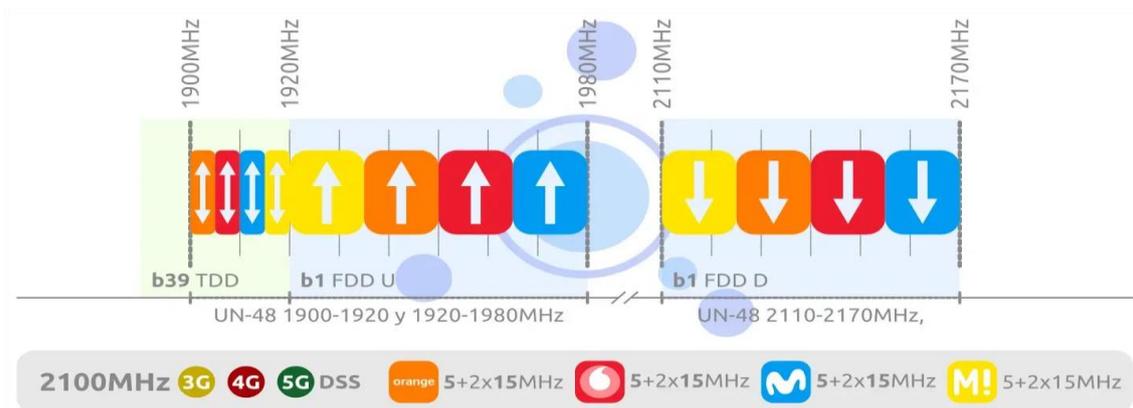


Figura 14. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 2,1GHz.

- 26 GHz– banda 258: soportada por pocos móviles. Uso próximo.
El Gobierno autorizó la subasta de la banda de 26 GHz (mmWave) en la segunda mitad de 2022, para la expansión del 5G de onda milimétrica. Esta banda, se sitúa entre los 24,25 GHz y los 27,5 GHz. Cuenta con tres bloques disponibles, pero se espera la liberación de dos bloques importantes, de 728 MHz cada uno, ocupados por radioenlaces bidireccionales que van de los 24,717 MHz a los 25,445 MHz y de los 25,725 MHz a los 26,453 MHz, respectivamente (véase Figura 15). Se estima que esta banda de 26 GHz será de gran importancia en comunicaciones electrónicas y en casos de uso de poca cobertura, alta capacidad y baja latencia, como el gaming o el sector transporte. Gracias a ella, podrán alcanzarse las velocidades más altas, pero únicamente en lugares concretos, y sin demasiados obstáculos entre la antena y el dispositivo. Será también útil para proporcionar grandes anchos de banda en zonas donde se produzcan enormes agrupaciones de usuarios, como estadios y zonas de tránsito.

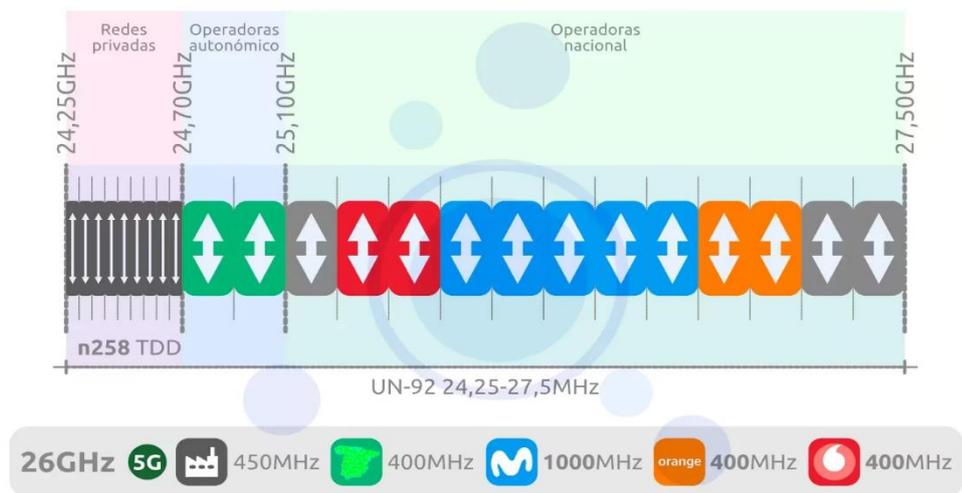


Figura 15. Asignación de frecuencias para telefonía 5G en banda de 26GHz.

En resumen, el total de espectro disponible por cada operador queda como se muestra en la Figura 16, donde se aprecia que Movistar es el operador con más espectro en bandas bajas, Orange el operador con más espectro específico para 5G, y Vodafone el operador con más espectro continuo, lo cual le permite ofrecer el doble de velocidad máxima que sus rivales, por el momento.

Reparto de espectro radioeléctrico en España para telefonía móvil							
	700 MHz (Banda 28) 5G	800 MHz (Banda 20) 4G	900 MHz (Banda 8) 2G y 3G	1.800 MHz (Banda 3) 2G y 4G	2.100 MHz (Banda 1) 3G y 4G	2.6 GHz (Banda 7 y 38) 4G y 5G DSS	3.5 GHz (Banda 78) 5G
Movistar	20 MHz FDD	20 MHz FDD	30 MHz FDD	40 MHz FDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	40 MHz FDD 10 MHz FDD en Madrid y Melilla	100 MHz TDD (40 MHz válidos hasta 2030) (60 MHz válidos hasta 2038)
vodafone	20 MHz FDD	20 MHz FDD	20 MHz FDD	40 MHz FDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	40 MHz FDD 20 MHz TDD	90 MHz TDD (válidos hasta 2038)
orange	20 MHz FDD	20 MHz FDD	20 MHz FDD	40 MHz FDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	40 MHz FDD 10 MHz TDD 10 MHz FDD excepto Castilla La Mancha, País Vasco, Asturias, Galicia, Madrid y Melilla	110 MHz TDD (40 MHz válidos hasta 2030) (70 MHz válidos hasta 2038)
MÁSMÓVIL	-	-	-	30 MHz FDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	10 MHz TDD en Madrid, Cataluña, Castilla-La Mancha y Andalucía	80 MHz TDD (válidos hasta 2030)

Figura 16. Tabla de reparto de espectro radioeléctrico en España.

Cuando hemos repasado las frecuencias de 2100 y 2600 MHz, hemos visto la diferenciación entre FDD y TDD, teniendo las operadoras diferente presencia con cada una de las tecnologías [16].

La duplexación por división de tiempo (Time-Division Duplexing, TDD) es una técnica para convertir un canal simplex en un canal dúplex separando las señales enviadas y recibidas en intervalos de tiempos diferentes sobre el mismo canal, usando acceso múltiple por división en

el tiempo. En resumen, se usa la misma frecuencia para ambos sentidos, repartiéndose el tiempo de emisión entre la estación base y los móviles conectados.

La duplexación por división de frecuencia (Frequency-Division Duplexing, FDD) significa que el transmisor y el receptor operan a diferentes frecuencias portadoras. El término es usado frecuentemente entre los radioaficionados, donde un operador está tratando de contactar con un repetidor. La estación debe ser capaz de enviar y recibir al mismo tiempo, y hace esto alterando ligeramente la frecuencia a la que envía y recibe. Este modo de operación es referido como modo dúplex o modo complemento. Dicho de otro modo, se usan 2 frecuencias en paralelo, una para la comunicación del móvil hacia la estación base y otra en el sentido contrario.

Estas son las dos tecnologías de transmisión de datos móviles que están bajo la norma internacional de LTE. En España y otros muchos países se utiliza prioritariamente FDD, mientras que, en otros países, como China o alguna operadora de Estados Unidos, TDD es el más utilizado.

Por los retrasos mencionados, no fue hasta 2022 cuando el despliegue retomó mayor relevancia. Más del 80% de la población española cuenta con cobertura 5G, aunque, hasta hace poco, la mayor parte se trataba de 5G DSS, lo que supone una mínima diferencia con respecto a las velocidades conseguidas por el 4G al implantarse mediante una actualización de software de los equipos de radio de 4G y 3G, sin necesidad real de cambio de antenas. Poco tiempo después se empezó a implantar 5G NSA, con su correspondiente cambio de antenas, e incluso se están instalando actualmente antenas activas de 5G SA, para su puesta operativa con NR en la banda de 3,5 GHz. Por tanto, en determinadas localidades el despliegue se está realizando en dos bandas, prestando especial servicio en las zonas con mayor índice de población, en contraposición con áreas donde predomina un entorno más rural: en la banda de 3,5 GHz (con peor penetración en interiores, pero más rápida) y en la banda de 700 MHz (con cobertura de mucho más alcance con una sola antena, pero con la velocidad más parecida a la obtenida en 4G)

De momento, los despliegues de cobertura 5G en España se mantienen de la siguiente manera, teniendo en cuenta la posibilidad de variaciones según se aceleren determinados procesos de despliegue:

- Movistar cuenta con más de 700 poblaciones con 5G. A partir de ahí estimó alcanzar 1.400 ciudades en 2022 y 2.400 municipios en 2023.
- Vodafone se propuso cubrir el 45% de la población con 5G a partir de 2022, llegando a 1.000 municipios, de los cuales, 133 son poblaciones de más de 50.000 habitantes, 605 poblaciones entre 1.000 y 50.000 y 245 son municipios de menos de 1.000 habitantes.
- Orange alcanzó la cifra de 1.100 municipios con 5G a lo largo de 2022, de los cuales, 140 poblaciones tienen menos de 1.000 habitantes, 820 municipios en poblaciones de entre 1.000 y 50.000 habitantes, y 140 municipios en poblaciones de más de 50.000 habitantes.
- Yoigo, del Grupo MásMóvil, no posee espectro en la banda de 700 MHz, por lo que su cobertura de 5G real se centra en un despliegue propio en 3,5 GHz, aunque afirma que dispone de 5G en el 54% de la población (gracias al 5G DSS y acuerdos con Orange).

La aceleración en los procesos de despliegue supone una cercanía cada vez mayor al objetivo de mejora en la velocidad. Pero para obtener el máximo rendimiento se necesita proporcionalmente la mayor cantidad de espectro contiguo disponible, así que la más alta velocidad solo está disponible en aquellos lugares con 5G en la banda de 3,5 GHz. En este

contexto Movistar y Orange pueden ofrecer máximos teóricos de 1,5 Gbps, Vodafone de 1,3 Gbps y Yoigo de 1,2 Gbps.

En conclusión, la instalación de las nuevas antenas, la implementación del nuevo núcleo de red y el nuevo espectro en la banda de 26 GHz, supusieron la llegada del 5G con todo su potencial, el 5G SA.

Nivel de exposición ambiental en la población española

Las Directrices de la International Commission for non-ionizing radiation Protection (ICNIRP) indican los límites de exposición a las ondas electromagnéticas no ionizantes para un amplio rango de frecuencias que alcanza hasta los 300 GHz (lo que incluye las bandas del 5G) [17]. Estas directrices contienen los límites de exposición propuestas para la protección de la salud de los individuos. Estas recomendaciones tienen apoyo de la Unión Europea, mediante su Recomendación 1999/519/EC, y la OMS. En España, estos límites se instauraron a través del Real Decreto 1066/2001 [18], los cuales se apoyan en las restricciones básicas y los niveles de referencia, para usarlos como indicadores:

- Las restricciones, que limitan la intensidad de cada banda y la suma de todas ellas, son indicadores de los niveles de exposición basados en los efectos sobre la salud conocidos. Su cálculo se produce según la cantidad de energía absorbida medida, conocida como Tasa de Absorción Específica (TAE, SAR, en inglés), cuya unidad de SAR es el vatio por kilogramo de tejido expuesto (W/kg).
- Los niveles de referencia permiten evaluar la exposición para no superar las restricciones. Estos niveles de referencia, medidos en W/m^2 , indican la densidad de potencia límite que los tejidos de la piel podrían absorber al ser expuestos a campos electromagnéticos. En España, la densidad de potencia establecida por la legislación es de $10 W/m^2$ para la banda de frecuencias de 2 GHz.

Con la implantación de la tecnología 5G, y gracias a estos indicadores, desde 2018 se han realizado infinidad de mediciones, cuyo valor máximo encontrado fue de $128,38 \mu W/cm^2$ en Madrid, con la conclusión de que en España no se han llegado a superar en ningún caso los límites generales que se consideran seguros expuestos por la ICNIRP, la UE y el RD 1066/2001. Estos límites se establecen en el rango de 41 a 61 V/m según las frecuencias.

Los niveles de referencia actuales para público en general que se emplean en 5G son de $3,5 W/m^2$ para 700 MHz, $10 W/m^2$ para 3,5 GHz y $10 W/m^2$ para 26 GHz.

Aunque los estudios indican que en España no se alcanzan límites de exposición establecidos, es conveniente tomar precauciones personales ante la exposición continua a campos electromagnéticos. Algunas precauciones generales podrían ser usar cables en lugar de wifi para conectar los dispositivos que lo permitan, desconectar los dispositivos en su periodo de inactividad o cuidar nuestro cuerpo manteniendo un estilo de vida saludable.

También podemos apoyarnos en las declaraciones de expertos como Ceferino Maestu, director del Laboratorio de Bioelectromagnetismo del Centro de Tecnología Biomédica en la Universidad Politécnica de Madrid [19]. Según Maestu, con la futura incorporación de frecuencias como 25GHz, 40 GHz y 80 GHz para 5G en España, deberemos estar expuestos el menor tiempo posible a las radiaciones que desprenden los móviles, antenas y routers porque nuestro cuerpo no está acostumbrado a una exposición a frecuencias tan altas, sobre todo cuando el periodo de

incidencia se eleva. Además, insta a decrementar lo máximo posible las tasas medias de radiación de la población española porque estas tasas no son iguales en todos los municipios.

CAPÍTULO 3

DESPLIEGUE DE UNA RED 5G

Gran parte de la explicación de este capítulo se expone gracias a conocimientos propios adquiridos en el apoyo de proyectos de despliegue de redes 5G, propulsados por la operadora Vodafone.

Para el despliegue de redes móviles se pueden realizar dos distinciones importantes: la red radio y los radioenlaces. El proceso que se va a explicar en este capítulo se enfocará en la red radio.

La red de radio se establece en un área de terreno específico, conocido como Estación Base (EB), el cual trata de una estación compuesta de una o más antenas de transmisión y recepción que cubren dicha área. Esta estación sirve como un control central para todos los usuarios situados dentro de una misma área. Se administran y se controlan por medio de un conmutador de servicios cuya función es la de controlar el procesamiento y establecimiento de llamadas, así como la realización de llamadas, lo cual incluye señalización, supervisión, conmutación y distribución de canales de radiofrecuencia. Su localización dentro del área suele situarse en:

- Azoteas de los edificios en zonas urbanas (véase Figura 17).



Figura 17. Sistema radiante en la azotea de un edificio.

- En lo alto de torres en zonas rurales (véase Figura 18).



Figura 18. Sistema radiante en lo alto de una torre tubular.

A continuación, se detallan las normas seguidas por las operadoras.

3.1. NORMATIVA

Inicialmente, las operadoras comenzaron realizando los despliegues de 5G en las principales grandes ciudades de España (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Zaragoza, Málaga, Murcia). Como primeros objetivos, se seleccionaron las calles principales de las zonas céntricas y de ahí se fueron expandiendo. Actualmente, con la mayor parte de estas grandes ciudades ya cubiertas, se está ampliando horizontes hacia zonas menos pobladas, como por ejemplo en regiones rurales de Castilla-La Mancha en el caso de Vodafone. A continuación, se van a introducir los detalles y procesos que conllevan el despliegue de una red móvil de telecomunicaciones, en este caso el 5G.

3.1.1 Ubicación

La elección del área en la que se realizará el despliegue, adecuado para ubicar una estación base de telefonía móvil, debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe situarse en un punto visualmente predominante sobre el entorno para garantizar la máxima cobertura posible con la mínima potencia emitida requerida.

- Debe permitir la colocación de una caseta para la ubicación de equipos. En zonas urbanas, estas casetas, situadas en las azoteas de los emplazamientos, deben mantener la estética del emplazamiento escogido.
- La estructura del emplazamiento debe permitir la ubicación de mástiles y soportes necesarios para la colocación de los elementos radiantes garantizando la máxima seguridad a las instalaciones.
- Debe estar cerca de la zona a la cual se quiere dar cobertura, ya que cuanto más cerca se encuentra de la zona sobre la cual se necesita dar servicio, menor es la potencia que necesita transmitir la estación base y menor es la potencia que deben transmitir los terminales móviles para funcionar adecuadamente.

Con la implantación del 2º dividendo digital, el despliegue local de las comunicaciones en las bandas de 700 y 800 MHz para el aprovechamiento por parte de los ciudadanos de los nuevos servicios móviles podría elaborar incidencias en la recepción de la señal de televisión, producidas por el encendido de los servicios. Las incidencias con más probabilidad de aparecer son la pérdida de alguno de los canales de televisión o, en ciertos supuestos, la pérdida de sonido o imágenes bloqueadas.

Para que el proceso de despliegue sea un éxito, no sólo es necesario la efectividad en el ajuste de las estaciones emisoras, sino que el público tenga una predisposición positiva a los efectos del despliegue, para lo cual es importante trasladarle los amplios beneficios de esta tecnología e informar en todo momento del proceso con transparencia y cercanía.

3.1.2. Niveles de operación y exposición

En España, para la instalación de una estación radioeléctrica nueva, el proyecto técnico de la misma debe incorporar un estudio detallado previo, que indique los niveles de exposición radioeléctrica en áreas cercanas a sus instalaciones que se encuentren en entorno urbano o donde puedan permanecer habitualmente personas. La aprobación de dicho proyecto técnico por parte de la Administración es imprescindible para la puesta en marcha de una nueva estación [17].

El estudio debe tener en cuenta los niveles de emisiones preexistentes a la puesta en marcha de la nueva estación, evaluados mediante medidas realizadas y detalla un volumen de referencia, que por lo general suele ser la de un paralelepípedo, de manera que fuera del mismo se garantiza que no se superarán los niveles de referencia. Si el volumen de referencia comprende zonas en la que pueden encontrarse personas habitualmente, éstas deben contar con vallado y señalización.

Para evaluar la exposición a campos electromagnéticos procedentes de antenas de telefonía móvil, se suele hacer uso de la distancia desde la antena en la que la señal de radiofrecuencia queda por debajo del límite de exposición especificado, conocida como distancia de cumplimiento o distancia de referencia. Con esta distancia de cumplimiento se puede instalar el nodo a una determinada distancia de los edificios y en altura, de manera que se impida el acceso del público. Por ejemplo, la distancia de cumplimiento o de referencia de un transmisor 5G que funciona a 3,5 GHz y transmite un total de 200 W utilizando una matriz de 64 antenas es de 25 m. La metodología para la verificación de los límites de exposición habría de adaptarse a las características de 5G.

En 5G, la combinación de asignación dinámica de recursos y MIMO masivo y el modo de transmisión en TDD hace prácticamente improbable que la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) máxima se pueda producir de manera continuada en la misma dirección durante un periodo determinado de segundos.

Las normas internacionales IEC 62232 y ITU-T K.100 establecen el uso de la potencia máxima real para realizar evaluaciones de cumplimiento más ajustadas a las condiciones reales.

En condiciones reales, la transmisión en modo TDD limitará el tiempo de transmisión, y no toda la potencia estará enfocada en la misma dirección por varios minutos, por lo que resulta muy improbable un 100% de utilización. Para ello, se ha desarrollado un modelo estadístico, incluido en el informe técnico IEC TR 62669 y en el ITU-T “*Supplement on 5G EMF compliance*”, para determinar la potencia máxima real de las antenas MIMO masivas 5G que se encuentra alrededor del 25% de la potencia máxima teórica para antenas de matriz 8x8.

También, los terminales móviles operan a niveles de potencia mucho más bajos que los máximos que pueden emitir, y adaptan constantemente la potencia a la mínima imprescindible para garantizar la comunicación, para prolongar así la duración de las baterías.

Teniendo en cuenta que no siempre se utiliza la máxima potencia en transmisión, que los diagramas de radiación no son estáticos y que la asignación de recursos para un terminal dado se realiza en un rango de unos pocos milisegundos, al igual que los tiempos de actualización, podría tener sentido ajustar el cálculo del volumen de referencia considerando un enfoque estadístico de la potencia.

Técnicas de minimización en la red de telefonía móvil de quinta generación 5G

- **Control de potencia**

La tecnología 5G se ha diseñado para maximizar la eficiencia en el uso de la potencia disponible. Salvo por una pequeña fracción de potencia que se dedica a la señalización de control, las antenas 5G únicamente emiten durante los intervalos en los que hay usuarios activos, limitando la potencia a la mínima imprescindible para proporcionar el servicio deseado. En general, a mayor cercanía de los usuarios, menor es la potencia necesaria para ofrecer un servicio dado.

- **Antenas massive MIMO**

Adicionalmente, las antenas 5G dotadas de la tecnología “Massive MIMO” son capaces de focalizar con gran precisión la potencia emitida en las direcciones en las que se ubican los usuarios activos. De este modo se hace un uso más eficiente de la potencia, y no hay necesidad de emitir a lo largo de toda el área de cobertura. Además, esta funcionalidad permite reutilizar los recursos radioeléctricos, de modo que varios usuarios pueden compartirlos, es decir, la potencia emitida total se reparte en varias direcciones diferentes simultáneamente minimizando aquellas zonas en las que no hay usuarios o en las que estos demandan menos recursos.

- **Transmisión TDD**

La banda de 5G de 3500 MHz se explota en modo TDD (“Time Division Duplex”), de modo que las transmisiones del uplink y el downlink se alternan en distintos intervalos temporales. Por

consiguiente, incluso en el caso de que hubiera una demanda constante de tráfico en el downlink, la antena únicamente podría emitir durante los intervalos asignados (aproximadamente un 75% del total del tiempo).

3.1.3. Seguridad

Para llevar a cabo los trabajos de despliegue e instalación, es imprescindible cumplir una serie de medidas de seguridad que serán inspeccionadas. Su incumplimiento puede suponer el impedimento de la puesta en marcha del proyecto. A continuación, se detallan las características más relevantes.

- ERL (Evaluación de Riesgos Laborales).

Para poder trabajar en el sistema radiante se deberá:

- usar de la línea de vida instalada game system.
- usar del sistema de doble anclaje.
- usar del sistema de fijación.
- usar de herramientas manuales de poco peso y siempre atadas a un cinturón portaherramientas para evitar su caída.
- subir el material con polea o sistema similar.
- Realizar la manipulación de antenas en torres por dos trabajadores, siendo uno de ellos recurso preventivo, de manera que mientras uno de ellos asegure la posición de la antena, el otro pueda montar, desmontar o aflojar los elementos de sujeción a los mástiles o elementos de soporte.

Cumpliendo estas normas, se eliminan o reducen las posturas forzadas y la manipulación incorrecta e insegura de cargas pesadas que pongan en riesgo la seguridad de un trabajador.

En cuanto a las adecuaciones para instalación de equipos:

- En el área de trabajo se tendrá sólo las herramientas y materiales necesarios, manteniendo así el orden y limpieza.
- Los residuos que se generen se introducirán en un contenedor cercano para su posterior desecho.
- Uso de guantes para evitar el contacto con sustancias tóxicas.
- Uso de gafas protectoras y ropa de trabajo que cubra la mayor parte del cuerpo para evitar daños.

Respecto al transporte y montaje de equipos:

- Comprobar que los equipos están desconectados.
- No transportar cargas pesadas sin ayuda de maquinaria.
- En el levantamiento de cargas ligeras seguir las recomendaciones correspondientes.

Cuando se trabaja dentro del volumen de protección radioeléctrica de las antenas se debe:

- pedir su desconexión o su reducción de potencia cuando la desconexión no sea posible.
- reducir el tiempo de trabajo dentro del volumen de protección de las antenas al mínimo indispensable.

- Tareas QC (*Quality Control*), con las que se verifica a la empresa principal las siguientes características:
 - i. Datos generales: datos del recurso preventivo, del resto de trabajadores, tipo de emplazamiento, línea de contratación y tipo de trabajos.
 - ii. Revisión de documentación, afirmando que:
 - se han revisado en las herramientas definidas por el operador las incidencias y la documentación de Seguridad y Salud del emplazamiento.
 - el recurso preventivo y los trabajadores coinciden con las designaciones en el listado para este emplazamiento.
 - se dispone y se ha leído y comprendido la documentación del emplazamiento incluido el anexo al Plan de Medidas Preventivas.
 - los trabajadores presentes están acreditados en la plataforma correspondiente.
 - iii. Acceso al emplazamiento, afirmando que:
 - en emplazamientos rurales se puede acceder en vehículo 4x4 u otro transporte alternativo homologado hasta las proximidades del emplazamiento cumpliendo las normas de seguridad.
 - el vehículo dispone de separación de carga, cinturones de seguridad, extintor de incendios, botiquín de primeros auxilios y se encuentra en condiciones óptimas.
 - iv. Para trabajos en torre, se revisa si:
 - existe sistema de protección anticaídas homologado instalado y señalizado, en buen estado y revisado en los últimos 4 años. La alternativa es utilizar cabo de doble anclaje.
 - es necesario el uso de plataforma elevadora de personal (PEMP) y alpinista.
 - los trabajadores llevan EPIs apropiados y están autorizados para los trabajos con riesgo eléctrico.
 - la torre dispone de toma a tierra.
 - no hay elementos sin protección frente al riesgo eléctrico o en mal estado.
 - las tareas que se realizan están a una distancia mínima de las líneas eléctricas aéreas.
 - Las condiciones climáticas e iluminación son adecuadas.
 - v. Para trabajos en azotea, se comprueba que:
 - el acceso a través de la claraboya tiene el espacio suficiente, sistema anticierre, desembarco que supere 1 m, fijo o con puntos de anclaje y barandilla
 - el camino de paso a menos 2 m de un borde con riesgo de caída en altura cuenta con barandillas o líneas de vida, rampas o zonas de paso seguro.
 - las escalas verticales tienen instalado un sistema anticaída, está señalizado y libre de obstáculos.
 - el área de trabajo es adecuado para trabajar.
 - se cumplen el resto de las condiciones descritas para trabajos en torre.

3.2. EQUIPOS

Antes de realizar cualquier trabajo es necesario conocer las herramientas que van a hacer posible el desarrollo y puesta a punto de los objetivos establecidos. Así, se introduce el concepto de sistema radiante, siendo este uno de los elementos más importantes en el ámbito de las telecomunicaciones, y el que más en este caso de despliegue, ya que un buen sistema radiante nos asegurará una emisión de calidad que llegará a todos los emplazamientos donde se quiera dar cobertura con el nivel de señal adecuado. Este sistema puede componerse de una o por varias antenas (array de antenas) [20].

Además de las antenas, podemos encontrarnos con la Red de Distribución de Potencia, que suministra a cada antena la potencia y la fase necesaria para conformar el diagrama de radiación deseado. Esta red de distribución se compone de:

- Distribuidor o *Splitter*, cuya función es el reparto de potencia (simétrico o asimétrico) a cada una de las antenas.
- Latiguillos, que permiten aplicar desfases entre las antenas del sistema.

Así es como, mediante agrupaciones o arrays de antenas, se pueden conformar diagramas de radiación para cubrir determinadas zonas sin interferir en otras adyacentes, dar más énfasis a un emplazamiento que a otro, lograr mayores ganancias, situar nulos en determinadas áreas donde no se desea radiar, o simplemente poder inclinar el haz principal de radiación para dotar al sistema de inclinación eléctrica.

Por consiguiente, se procede a introducir los componentes más importantes en un despliegue de redes móviles de telecomunicaciones, centrándonos en los actuales para 5G.

3.2.1. Antenas

La antena es el elemento principal del sistema radiante, diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia/desde el espacio libre [21]. En el modo de transmisión, su función es radiar la energía suministrada por el transmisor, la cual lleva la información que debe de llegar a todos los destinatarios de un área concreta, siendo esta información una señal eléctrica transformada en una onda electromagnética. De igual modo, actuando como receptores, las antenas realizan la función inversa, es decir, reciben la onda electromagnética y la transforman en una señal eléctrica que se distribuye a los dispositivos destinados.

Como introducción, se van a exponer algunos de los tipos más comunes de antenas que existen, clasificados según su directividad:

- Antenas isotrópicas: es una antena ideal que radia en todas direcciones en cualquier plano del espacio. Son teóricas y realmente se tienen como referencia, pues su definición es necesaria para comprender los diferentes parámetros que componen la antena.
- Antenas omnidireccionales: son antenas cuya radiación se propaga en todas direcciones 360º con respecto al horizonte, por lo que se utilizan cuando se quiere transmitir una señal a muchos receptores cuya localización es desconocida (ver Figura 19). Se utiliza en

dispositivos simples que no requieren una ganancia muy alta (antenas monopolo y dipolo).

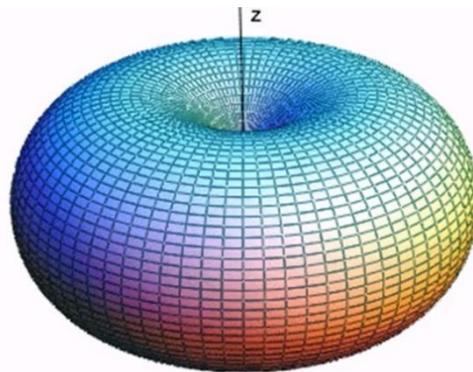


Figura 19. Representación del diagrama de radiación de una antena omnidireccional.

- Antenas direccionales o directivas: su ancho de haz es más estrecho, por lo que su radiación se propaga a mayores distancias. Pueden ser unidireccionales o multidireccionales. Tienen mayor ganancia que las antenas omnidireccionales. Algunos ejemplos son las antenas Yagi-Uda, de bocina, de parche, y las parabólicas. Un ejemplo se ve en la Figura 20:

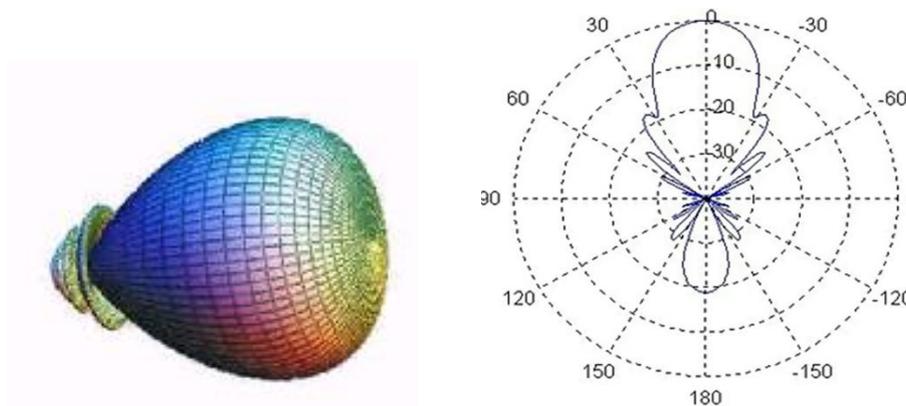


Figura 20. Representación del diagrama de radiación de antena direccional unidireccional.

Dentro de este grupo incluiremos a las antenas que actualmente comprenden el amplio rango de cobertura en todo el país y numerosas partes del mundo: las antenas sectoriales, es decir, antenas direccionales que radian sobre un sector o área concreto. Este concepto será más relevante conforme avance la explicación en cuanto al método de cobertura de red del terreno, como se muestra en la Figura 21.

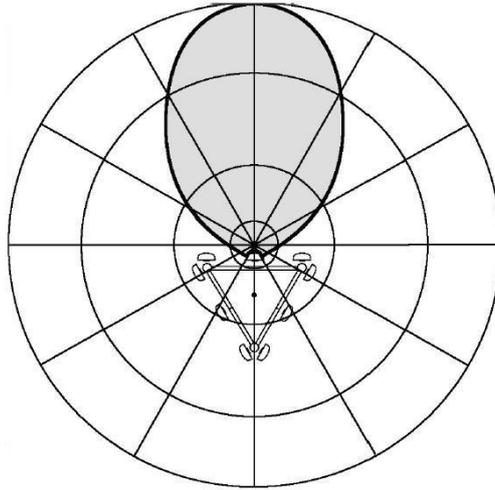


Figura 21. Diagrama de radiación de una antena sectorial. [22]

Con respecto a la frecuencia, generalmente las antenas que trabajan en este tipo de sistemas de telecomunicaciones son multibanda o tienen todo el espectro posible de frecuencia. Para el despliegue se hace uso de dos tipos de antenas diferentes, en las que varían las frecuencias de trabajo:

- Antenas pasivas: son las antenas que agrupan el espectro de frecuencias general, actualmente comprendido entre 700 MHz – 2,6 GHz. Según la marca y el modelo las encontraremos con predisposición de 8 o 12 bocas generalmente, por las que se redirige la señal radioeléctrica que se conecta con su determinada RRU (ver Figura 22).



Figura 22. Agrupación de antenas pasivas.

- Antenas activas o AAU (*Active Antenna Unit*): son las que comprenden el rango de frecuencias del 5G en la banda de 3,5 GHz. El rango de frecuencias específico variará según la operadora, como ya vimos anteriormente en la asignación de la banda de 3,5 GHz para las operadoras de España. Estas antenas son básicamente un array de antenas, ya que se componen de una matriz de 64x64 gracias a la tecnología MIMO (véase Figura 23). Estas antenas no se conectan a ninguna RRU, puesto que están diseñadas para realizar la función de estas en su interior. Se puede decir que una antena activa es la combinación de una antena pasiva y una RRU. Es por ello que su conexión va directamente unida tanto a la BBU como a la toma de alimentación, ya sea la DCDU o el *Boost Voltage* [23]. En el Anexo I se encuentra información sobre un modelo de este tipo de antenas, las AAU5639w.



Figura 23. Imagen de una antena activa 5G.

En la configuración de las antenas nos encontramos con diferentes características que serán relevantes para el correcto impacto en cuanto a la cobertura de los clientes de una determinada zona. Podemos diferenciar [21]:

- a) Diagrama de Radiación: determina el campo de incidencia de la antena, ya sea omnidireccional o directivo, según lo visto en la explicación anterior.
- b) Polarización: es la dirección que toma el vector de campo eléctrico de una onda electromagnética con respecto al plano horizontal, o dirección dentro de un plano. En resumen, indica el modo en el que se propaga la radiación emitida por la antena en el campo eléctrico y magnético. Diferenciamos entre polarización lineal y circular, estando éstas relacionadas con la posición y geometría de los elementos radiantes que componen las antenas, respectivamente.
- c) Potencia de transmisión: es la potencia en dBm de la antena. Se toma como referencia 1 mW (1 milivatío) como potencia mínima de una antena.
- d) Ganancia: se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

- e) Relación señal-ruido: cociente entre el nivel de la señal en un punto y el nivel del ruido en ese mismo punto, suele expresarse en dB. Una antena ideal no emitiría ruido, pero la propagación de la onda en el espacio genera ruido.
- f) Azimut: indicará el punto exacto en el que debemos fijar el punto de incidencia de la antena en el plano horizontal. Este ángulo azimut se mide desde el norte geográfico en sentido de las agujas del reloj, como se representa en la Figura 24.



Figura 24. Designación de azimut [24].

- g) Tilt: es la inclinación el punto de incidencia de la antena respecto al eje vertical. [25] Se distinguen dos tipos de tilt:

- Eléctrico: se consigue modificando las características de la fase de la señal de cada elemento de la antena. En este caso, el apuntamiento del diagrama de radiación de la antena varía notablemente. Por lo general se puede realizar este ajuste en remoto, lo que se conoce como RET (*Remote Electrical Tilt*).

- Mecánico: es el ángulo de inclinación que tiene la propia antena respecto a la vertical, que permite variar el patrón de cobertura de la antena. Cuando la antena se inclina hacia abajo, se denomina '*downtilt*', que es el caso más normal. Si la inclinación es hacia arriba, se denomina '*uptilt*'. En este tipo de despliegues suele tener un valor de 0º en antenas pasivas y una determinada inclinación para antenas 5G.

Acorde a la Figura 25, podremos calcular el tilt mediante la siguiente fórmula:

$$T = \cot\left(\frac{H}{X}\right) \quad (1)$$

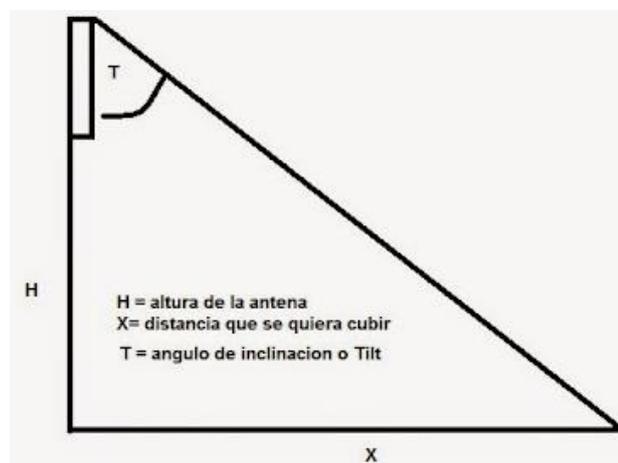


Figura 25. Cálculo del tilt.

- h) **Lóbulo de radiación:** es el vector espacial en el que la energía de radiofrecuencia es radiada con mayor intensidad desde la antena al entorno, como se representa en la Figura 26. Las antenas directivas suelen tener un lóbulo principal (el de mayor ganancia, que se apunta a la zona de cobertura) y varios lóbulos secundarios (laterales y posteriores).

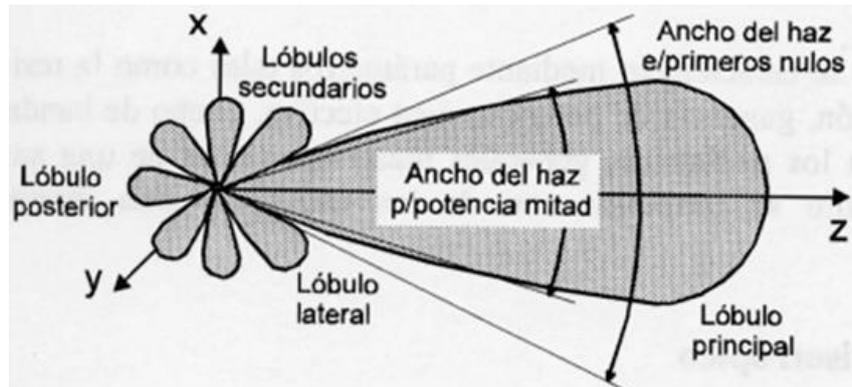


Figura 26. Representación de la radiación de una antena directiva.

3.2.2. RRU

La unidad de radio remota (RRU) es un hardware que se encarga de realizar todo el trabajo de radiofrecuencia en una estación base. Según su modelo y la tecnología que utilicen, tendrán un determinado ancho de canal, frecuencia y potencia de transmisión, la cual se dirige a las antenas mediante cable coaxial (véase Figura 27) [23].

En la época de las estaciones base de 2G, la parte de unidad de banda base y la parte de unidad de radiofrecuencia estaban integradas en un gabinete, y el puerto de la unidad de radiofrecuencia se conectaba a la antena a través del alimentador. Pero con la llegada del 3G, apareció una estación base con unidad de banda base separada y unidad de radiofrecuencia, la cual se denominó estación base distribuida. La parte de la banda base se denominó como BBU y la unidad de radio como RRU.

Previo a la aparición del 5G, cada RRU contenía una sola tecnología correspondiente a las generaciones anteriores, con su rango de frecuencia correspondiente. Tras la evolución del 4G, y gracias al despliegue de redes 5G, empresas como Huawei están proporcionando a sus operadoras RRUs capaces de soportar múltiples tecnologías. La principal diferencia que presentan los nuevos modelos de RRU con respecto a los antiguos es que los nuevos son capaces de agrupar las tecnologías correspondientes a las frecuencias de 700MHz, 800MHz y 900 MHz, por un lado, o las de 1800MHz, 2100MHz y 2600MHz por otro lado. Ejemplos de modelos de estos equipos que soportan varias tecnologías son las RRU5519et, RRU5515t, RRU5502w o RRU5517t. Gracias a esto se puede ahorrar también en espacio y costes, ya que se reduce físicamente la cantidad de estos equipos necesarios para transmitir cada una de las tecnologías. Este mismo hecho permite además liberar peso del nodo, cuantos menos equipos haya menor será el peso que habrá que albergar.



Figura 27. Imagen de diferentes RRUs en una estación base.

3.2.3. BBU

Una unidad de banda base (BBU, del inglés *Base Band Unit*), también conocida como Nodo B, es un dispositivo de redes de telecomunicaciones que se emplea para procesar señales de banda base. El término banda base hace referencia a la frecuencia original de una transmisión antes de la modulación. La red de acceso de radio (RAN) tradicional consta de una BBU conectada a una o más unidades de radio remotas (RRU) ubicadas cerca de las antenas. La unidad de banda base actúa como el “hub” centralizado de la estación base, y procesa el tráfico de datos del enlace ascendente y el enlace descendente, además de controlar la funcionalidad de las RRU. Una BBU convencional consta de un procesador de señales digitales (DSP) que se emplea para convertir señales analógicas a digitales y viceversa.

Las BBU se componen de varias tarjetas que se incluyen en los diferentes SLOTS que la componen, pudiendo ser estas tarjetas controladoras (UMPT), tarjetas de capacidad o procesado de banda base (UBBP), u otros tipos de tarjetas. A continuación, se procede a realizar una breve introducción a las más relevantes en cuanto a conexiones 2G/3G y 4G/5G:

- UPEU (*Universal Power and Environment Unit*): entrega energía a todo el equipo. Contienen conexión de alarmas para el aviso ante cualquier incidente. Suelen estar a una tensión de -48V.
- UMPT (*Universal Main Processing and Transmission Unit*): tarjeta principal que se encarga de todo el proceso de datos del sistema de telefonía móvil. Se interconecta con la red IP del sistema, conocida como RNC, que conecta todos los sistemas móviles. Se insertan principalmente en el SLOT 7, cuando es una, o también en el 6, si son dos.
- WBBP (*WCDMA Base Band Processing*): se encargan de entregar telefonía y datos móviles en 3G. Se interconectan mediante fibra óptica a las RRU. Maneja los recursos disponibles de radio mediante los *Channel Element* (CE).
- UBBP (*Universal Base Band Processing*): tarjeta de capacidad que procesa las diferentes tecnologías que se conectan a ellas mediante fibra óptica desde las RRUs. Dependiendo

de la versión de estas tarjetas, podrán almacenar diferentes tecnologías (por ejemplo, una UBBPg3 se utiliza para la conexión de las frecuencias reservadas para el 5G, y sobre las que se puede incluir el LTE cuando este está unido a la banda de 700MHz, ya que tienen mayor capacidad. Otras versiones como la UBBPg2 o la UBBPg1 se suelen reservar principalmente para el LTE o las tecnologías de 2G/3G). Se insertan entre los SLOTS de 0 a 5.

- La tarjeta FAN permite la ventilación del equipo para evitar su sobrecalentamiento.

Gracias a la interconexión entre las antenas GPS y la torre mediante la BBU, se obtiene sincronismo y se posibilita la funcionalidad conocida como traspaso o “*handover*”, la cual quiere decir que al estar hablando desde una zona móvil y desplazarse a otra zona móvil, se facilita la seguridad de continuar con la llamada sin cortes.

A continuación, se muestra en las siguientes Figuras 28 y 29 la estructura de las BBUs según su modelo y un ejemplo de la BBU5900, respectivamente:

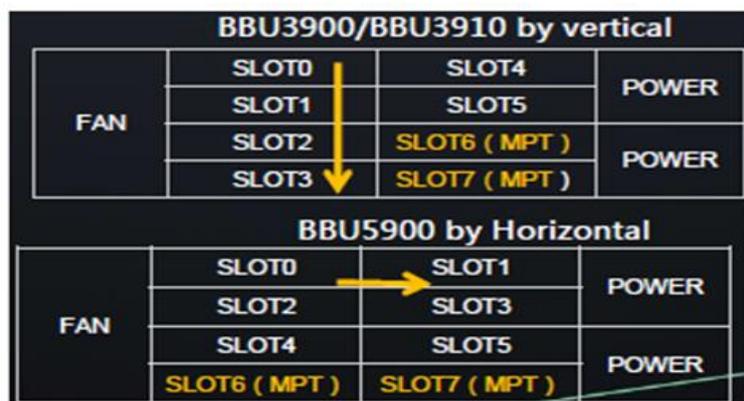


Figura 28. Estructura de las BBU según su modelo.



Figura 29. Vista de una BBU5900 con tarjetería UBBP y UMPT insertada y fibras ópticas conectadas.

3.2.4. DCDCU

Conocida como DC-PDU, es una unidad de distribución de fuente de alimentación, generalmente con -48V. Este elemento es la principal fuente de alimentación de los equipos que se conectan a sus puertos, los cuales suelen ser generalmente la RRU o la BBU, incluyendo las antenas 5G.

Esta conexión entre equipos se realiza mediante cableado de alimentación específico (ver Figura 30).



Figura 30. Vista de 2 DCDU-12B alimentadas por 1 disyuntor de 100 A respectivamente.

3.2.5. Boost-Voltage

Este elemento, también conocido como convertidor *buck-boost*, es un suministro de energía de modo conmutado (*Switch Mode Power Supply; SMPS*), cuya finalidad es recibir una tensión de corriente continua de entrada y obtener de salida un nivel de tensión de corriente continua diferente, ya sea al subir o bajar la tensión. Es decir, pretende que la tensión de entrada genere una tensión de salida mayor a la tensión de entrada. Esto permite que el nivel máximo de tensión cargue el sistema de forma expedita. Suele ser generalmente la fuente de alimentación de las antenas 5G.



Figura 31. Imagen de un Boost Voltage [26].

3.2.6. Mimetizado

La instalación de antenas en zonas rurales o de poca población no suele causar efectos visuales perjudiciales. Por el contrario, el despliegue masivo de antenas en zonas muy pobladas puede

alterar el ecosistema visual, llegando a ser muy llamativas en muchos casos. Determinados emplazamientos acuerdan con las operadoras la instalación de estructuras que camuflen la mayor parte de equipamiento posible en el proceso de despliegue, con el objetivo de mantener en buen estado la estética del área de instalación. Este proceso es el que se conoce como mimetizado.

La instauración de estos mimetizados suele ser más común en zonas en las que el equipamiento instalado se encuentra en azoteas de edificios, los cuales generalmente suelen tener como soporte un mástil autoportado, aunque también existe la posibilidad de instalación en torres.

Dada la magnitud de estos elementos en muchos casos, los trabajos se suelen desarrollar en horarios nocturnos, en la medida de lo posible, por la necesidad de grúas para el acoplamiento y para evitar excesivo desplazamiento de personas en el entorno de trabajo.

Tipos de mimetizado:

- Vallas publicitarias (ver Figura 32). Estas estructuras se utilizan principalmente para la mejora de la estética del área en el que está situado el nodo, ocultando a simple vista la identificación parcial o total del sistema radiante.

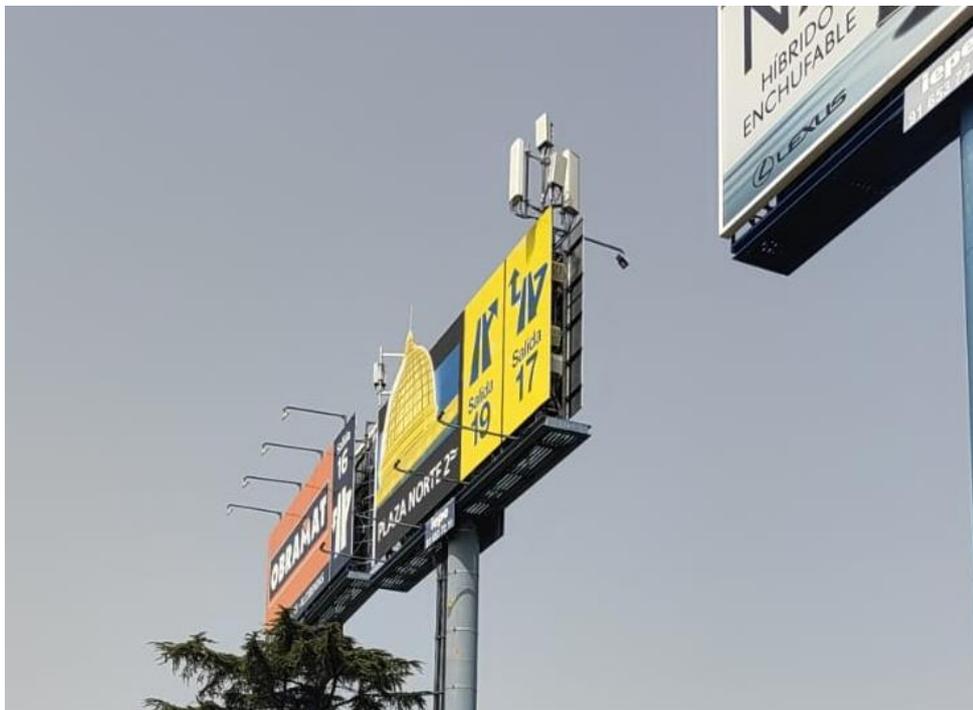


Figura 32. Vallas publicitarias que albergan equipos del sistema radiante.

- Slim: estas son estructuras de fabricación específica para albergar tanto antenas pasivas como antenas activas, con unas dimensiones concretas que dificultan la manipulación directa de los equipos instalados en su interior, lo cual proporciona protección a los mismos. Veamos un ejemplo en la Figura 33:



Figura 33. Mimetizado SLIM en cuyo interior se encuentran las antenas.

3.2.7. Equipo de Fuerza

Debido a que los equipos de radio y transmisión se alimentan con corriente continua, necesitamos instalar en la estación base un equipo que sea capaz de suministrar dicha corriente. Estos equipos han ido evolucionando hasta el punto de diferenciarlos con nombres propios, como por ejemplo el TP48400, como vemos en la Figura 34. En los equipos de fuerza se almacenan los equipos de alimentación y suministro de energía de la estación base, como la BBU, la DCDU, el *Boost Voltage*, etc, como se puede ver en la Figura 35:



Figura 34. TP48400.



Figura 35. Vista de equipos que alberga el TP48400.

3.2.8. Antena GPS

Artefacto que permite la geolocalización de los diferentes dispositivos electrónicos, tales como teléfonos móviles, ordenadores, tablets. Esto facilita la interconexión de un dispositivo entre diferentes estaciones base cuando se encuentra en movimiento. Estos equipos proporcionan funcionalidad para el 5G. Observamos en las Figuras 36 y 37 un ejemplo de una antena GPS:



Figura 36. Imagen de antena GPS.



Figura 37. Vista ampliada de antena GPS.

3.3. METODOLOGÍA DEL DESPLIEGUE

3.3.1. Fases del despliegue

Comúnmente conocemos esta etapa como proceso de despliegue. El proceso de despliegue puede conllevar la instalación de equipos sobre una estación base nueva en la que no hubiese previamente ningún equipo presente, o también puede realizarse sobre una estación base en la que se pretenda modernizar equipos existentes, lo cual es más conocido como swap de red, por su significado en inglés (cambio o reemplazo). Este swap de red se produce cuando un operador de telefonía quiere cambiar el sistema radiante en una localización concreta del entorno en el que está actualmente transmitiendo ondas electromagnéticas por otro más renovado. Generalmente, los swaps implican cambio de proveedor, es decir, cambia la marca y modelo de los equipos existentes. Aunque el principal elemento a renovar, durante el proceso de *swap*, suelen ser las antenas, también es frecuente el cambio o añadido de nuevas RRUs, BBUs, DCU, etc.

La expectativa final tras los swaps de red es poder satisfacer las necesidades de los clientes de manera óptima, ajustándose a las innovaciones tecnológicas del momento, para ofrecer sin inconvenientes los nuevos servicios que se presentan. De esta manera, se pretende solucionar las incidencias producidas por problemas de conexión, falta de cobertura, baja velocidad de transmisión de los datos, etc.

Con lo expuesto, se procede a realizar una primera introducción resumida sobre las fases de despliegue. Acto seguido se expondrán con más detalle aquellas fases que requieran de una explicación más extensa.

El proceso desarrollado para realizar un despliegue es el siguiente:

- (i) Principalmente, se tiene que concretar cual será la próxima localización óptima para establecer un despliegue, es decir, el emplazamiento.
- (ii) Una vez se conoce el punto en que se pretende realizar el despliegue, los técnicos y personal autorizado acudirán al emplazamiento para evaluar las características del sistema radiante y los equipos existentes, el área de trabajo, y sus proximidades. Este proceso es lo que se conoce como replanteo.
- (iii) Se analizan los KPIs más convenientes.
- (iv) A continuación, se elaboran los planos con detalles de los trabajos pertinentes.
- (v) Se espera al Site Ready por parte de la propiedad, el cual se basa en la confirmación de que se han realizado las adecuaciones oportunas en el recinto para poder iniciar el proceso de despliegue.
- (vi) Se comienzan los trabajos y se realiza el despliegue previamente descrito en el acta de replanteo, implantando el nuevo sistema en la localización definida.
- (vii) Se realizan las tareas de control pertinentes durante el proceso de despliegue.

3.3.1.1. Etapas Pre-Swap

- Elección del emplazamiento

Este proceso implica realizar un estudio en el que se identifican las estaciones base ya instaladas y se analiza tanto la capacidad (el tráfico de datos que comprende ese punto o

nodo para evitar que se produzca saturación de uso), como el área de cobertura que comprenden, hasta encontrar una zona ciega o espacio del terreno en el que no se advierta cobertura. Esta cobertura suele conformarse mediante la traza de un radio, conocido como radio de cobertura. Una vez identificada esta zona ciega, se realizan simulaciones para comprobar si, dado el coste que implica cada despliegue, basta con la simple reorientación de determinados sistemas radiantes para poder cubrir esa área. De no ser así, las operadoras analizan el tamaño del entorno en busca de emplazamientos de su propiedad y eligen el más conveniente como próximo emplazamiento a cubrir.

Si una operadora A está dispuesta a realizar el despliegue, pero la mejor ubicación para realizarlo se sitúa en un terreno propiedad de otra operadora B, éstas pueden llegar a un acuerdo por el que A paga una cantidad de dinero a B para realizar obras en su propiedad, lo que denominaremos como co-ubicación. Esta opción es muy común en el caso en el que se encuentren varias opciones óptimas de ubicación de los nuevos dispositivos en el que la operadora A no tiene propiedades en el terreno y se encuentra con ubicaciones pertenecientes a otras operadoras y ubicaciones libres. En el caso de estas últimas, las operadoras deberían pedir permisos y documentación añadida, y el proceso que esto implica, sobre todo los costes, suele ser motivo por el que a veces se prefiere la co-ubicación.

- Replanteo

En todas las obras hay una serie de pautas que se deben ir cumpliendo. Algunas de ellas son el replanteo, la elaboración del acta de replanteo y la firma de ésta.

El replanteo es el proceso por el que una o varias personas, entre las cuales puede encontrarse un técnico de antenas, personal de ingeniería y/o personal responsable de la ejecución del despliegue como la operadora y sus contratadas/subcontratadas, acude al emplazamiento donde se encuentra el nodo de interés. Allí, se realizan los diversos análisis del entorno, tales como inspección del terreno de trabajo, estado de los equipos actuales, cantidad de éstos, vallado, disposición de sistemas de protección... Es decir, todo aquello que sea relevante para la realización de los trabajos.

El acta de replanteo es el documento escrito que da validez al comienzo de las obras de ejecución. El acta de replanteo lo deben firmar las personas nombradas anteriormente, es decir, tanto los responsables de verificar el correcto estado del emplazamiento y disponibilidad de realización de trabajos como aquellos que vayan a llevar a cabo dichos trabajos. También es apropiado que el coordinador de seguridad y salud de la obra firmen el acta, aunque no hay obligación por parte de éstos.

- Análisis de KPIs

Los KPIs (del inglés *Key Performance Indicators*, Indicadores Clave de Desempeño en castellano) son ciertas características que ayudan a determinar las mejores decisiones respecto al estado actual del proyecto, obteniendo información sobre la productividad que tendrán los proyectos finales que se han concretado, para así poder actuar conforme a los objetivos marcados. En el ámbito de despliegue de redes 5G, alguno de los KPIs se centrará en la correcta configuración de las antenas para alcanzar el objetivo de cubierta de cobertura esperado. Para ello se tendrán que hacer correctos cálculos de azimut y tilt, en mayor

medida. Esta tarea es principalmente desarrollada por cada operadora en cuestión. Por tanto, aunque las operadoras puedan tener objetivos comunes de cubierta de cobertura y eficacia, cada una dispondrá de KPIs propios para el cumplimiento de sus propios objetivos. [27] [28].

- Planos del terreno

Se procede a elaborar planos del emplazamiento, apoyándose en los datos recogidos del replanteo. Estos planos incorporarán una explicación detallada sobre los trabajos a realizar, diferenciando entre la situación *pre-swap* y *post-swap*, así como las tecnologías disponibles en ambos procesos, los elementos a utilizar y la interconexión entre ellos. Como añadido, contendrán bocetos, a diferentes alzados, sobre la situación real del emplazamiento. Por tanto, en los planos se especifica:

- Localización del emplazamiento.
- Tipo de emplazamiento, mediante imágenes tanto satelitales como en relieve y en situación normal. Como se especificó anteriormente, los emplazamientos más habituales suelen ser:
 - i. Azoteas de edificios, en los que el soporte en el que se sitúan las antenas y algunas RRUs suele ser un mástil autoportado, como el de la Figura 38.



Figura 38. Mástil autoportado. [29]

- ii. Torres, donde diferenciamos principalmente entre torre tubular (Figura 39) y torre de celosía (Figura 40).



Figura 39. Torre tubular.



Figura 40. Torre celosía.

- Número de sectores: los emplazamientos pueden tener 1 o varios sectores, en función del área de cobertura a cubrir.
- Detalles de las antenas: influencia del número de sectores, de la que dependerá el azimut de las antenas. Habitualmente, encontramos emplazamientos con 3 sectores. En estos casos lo esperado es que cada antena cubra 1/3 del radio de cobertura, por lo que la disposición más recurrente de azimut en las antenas será 0º, 120º y 240º, respectivamente.
- Cantidad de elementos, tanto antiguos como reformados, ligado a la designación del número de sectores. Por lo general, es frecuente que cada sector cuente con una antena pasiva conectada a una o más RRUs, dependiendo del número de tecnologías que soporte. Adicionalmente, se incluye en cada sector una antena activa 5G, con la frecuencia correspondiente a su operadora (3700 MHz en el caso de Vodafone, recibiendo así el nombre de NR3700). El resto de los elementos suelen hacer funciones de alimentación de los equipos anteriormente nombrados y se instalan por site, es decir, un equipo agrupa a todos los sectores para su alimentación, aunque con excepciones. Por ejemplo, en el caso de disponer de tres o más sectores con antenas activas y pasivas y RRUs que ofrezcan los rangos de frecuencia habituales actualmente (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz) será frecuente encontrar 2 o 3 BBU's y DCU's (para 2G/3G y 4G/5G).
- Medidas preventivas de seguridad para mantenimiento y trabajos posteriores.

La elaboración de los planos será necesaria para el correcto desempeño de los trabajos, según las medidas estudiadas. Como excepción, en el caso que no se disponga de planos se seguirá la información detallada en el acta de replanteo.

- Site Ready

Con todos los datos del replanteo confirmados y la elaboración de los planos se declara el *Site Ready*. Esta acción es la validación, por parte de la propiedad, de la realización de los trabajos especificados en ese emplazamiento determinado. Sin la confirmación de este punto, no se podrán comenzar los trabajos de despliegue.

3.3.1.2. Swap

Días previos a la fecha marcada para la realización del despliegue se debe haber gestionado correctamente la petición de acceso al emplazamiento elegido, la acreditación de los trabajadores en las correspondientes plataformas de las operadoras y el resto de documentación necesaria para la autorización a los trabajadores de atender al despliegue de forma legal.

Además, será conveniente apagar o reducir la emisión de energía de los equipos lo máximo posible para evitar posibles incidentes en cuanto a radiación, aunque esto implique la deficiente operatividad de esa estación base en el desarrollo del swap de la red en el nodo.

Una vez los trabajadores llegan al emplazamiento, tienen que realizar los siguientes pasos:

- Clock-in

Básicamente, este paso consiste en fichar como a la hora de entrada al trabajo. Este proceso implica que los trabajadores confirman su presencia en la estación base. Esta confirmación se realiza a través de una determinada aplicación, según la operadora y/o el proveedor de los materiales.

- Site Sign

Desde la misma aplicación se realizará una verificación del material. Esta verificación consiste en la anotación de la cantidad de material disponible en el momento, en comparación con lo realmente necesario para realizar los trabajos sin ningún inconveniente.

- Site Verify

Acción complementaria a la anteriormente comentada. En este caso, mediante fotografía, se verifica el material del que se dispone para el desempeño de las actividades.

Estos pasos son necesarios para asegurar, entre proveedor y operadora, la integridad de todas las partes en cuando a envío, recepción y uso óptimo del material.

- Tareas QC

Elaboración de las tareas sobre revisión de los elementos de seguridad descritos anteriormente, en el apartado seguridad de la normativa de despliegue.

A continuación, se procederá a la instalación de los equipos, según lo especificado en el acta de replanteo y según se podrá observar en los planos aprobados por todas las partes.

Una vez se encuentran los técnicos en el emplazamiento, y previamente al inicio de ningún trabajo, estos comprobarán que hay energía en el nodo, mediante la observación del funcionamiento o no de los equipos existentes, es decir, que los equipos que se pretenden instalar podrán conectarse a una fuente de alimentación que permita su funcionamiento. Además de este paso, también se comprobará que en este nodo se han incorporado los equipos

de transmisión (Tx) correspondientes, ya que sin estos no se podrán introducir los ficheros de datos que doten de funcionalidad a la BBU, y por consiguiente no se podría gestionar el tráfico de datos y señales entre los equipos de radiofrecuencia.

Para el proceso de *swap* de antenas se seguirán las normas de manipulación de objetos especificadas en la normativa. Se prestará especial atención a las configuraciones de tilt y azimut especificadas para cada antena, lo que permitirá su correcta incidencia en el radio de cobertura inicialmente analizado. Las configuraciones de tilt se confirmarán en el momento de la instalación con un técnico de la operadora para la que se esté realizando el despliegue. Además, se llevarán a cabo las correspondientes tiradas de latiguillos y cables coaxiales para su conexión con los respectivos equipos que posibilitarán el servicio y operatividad de las antenas.

Mismo cuidado se tendrá para el *swap* de RRUs, en especial si éstas se encuentran en altura al igual que las antenas. La RRU se conecta a las BBU a través de diferentes tarjetas con diferentes modos de operación. Esta conexión se realiza mediante fibra óptica que puede ser monomodo o multimodo, según la distancia de operación, además de un cable eléctrico proveniente de una planta rectificadora que proporciona una energía de -54 V al equipo en corriente continua. La fibra óptica se conecta a una interfaz denominada CPRI (*Common Public Radio Interface*) la cual entrega todos los datos para que se conecten los usuarios a la red. Mediante cable coaxial, se realiza la conversión a radiofrecuencia y se envía la señal de radio hacia las antenas de la torre. Este cable debe tener una predisposición e instalación lo más perfecta posible, de lo contrario puede afectar al funcionamiento y al ROE en la comunicación. El problema que esto puede generar es la producción de ruido, normalmente cuando el cobre de dentro del coaxial no tiene un corte de 90° (recto), por lo que esta señal se distorsiona al pasar de ese punto a la zona de transmisión (es lo que pasa cuando en una llamada se escuchan sonidos como ruido blanco). La puesta a tierra también será un punto a tener en cuenta para proteger los equipos y al personal que lo manipula.

Como norma general, las RRUs se instalarán lo más próximo posible a las antenas de radio, aprovechando elementos estructurales existentes en los emplazamientos. En el caso de instalación en torre de menor robustez, se instalarán las RRUs necesarias a una altura cercana al nivel del suelo, diferenciando mediante etiquetado y algún otro indicador el sector al que pertenece cada una.

El resto de los equipos suelen encontrarse en casetas o en el interior de los equipos de fuerza, por lo que su reemplazo, instalación o desinstalación, en caso de ser necesario, no implica grandes esfuerzos.

Todos los equipos presentes en el emplazamiento (sean antenas, BBUs, Boost voltaje, etc.) deberán tener su correspondiente etiquetado. También se realizará etiquetado para las conexiones entre los equipos (ver Figura 41).



Figura 41. Etiquetado de fibras ópticas y alimentaciones.

Una vez están todos los equipos activos y conectados (véase la Figura 42), se realiza junto con operadores expertos las diferentes pruebas para la verificación del correcto conexionado y funcionamiento de los equipos, acorde a lo especificado en el planteamiento de los trabajos a realizar. Se comprueban, además, los valores de RET y ROE para solucionar o evitar las posibles interferencias en el servicio. Estas comprobaciones generalmente las realiza el técnico instalador presente en el emplazamiento con el personal de operaciones correspondiente que configura los equipos de manera remota.

Al finalizar, y antes de abandonar el emplazamiento, deberán los trabajadores realizar el *clock out*, es decir, realizar la misma función que en el *clock in* pero esta vez indicando su finalización y abandono de las instalaciones.

Aunque son normas generales, no sería de extrañar que estos pasos varíen según la operadora y proveedor del que se trate.



Figura 42. Instalación de sistema radiante.

3.3.2. Fases de implementación

Tras el proceso de *swap* de los sistemas radiantes es necesario concretar una serie de fases de implementación de la tecnología 5G a fin de garantizar su correcta predisposición. Estas fases se estructuran en:

a) Fase 1: verificación y validación tecnológicas.

Esta fase incluye la verificación de los servicios y las funciones de red virtual para garantizar de inmediato la calidad y la confiabilidad una vez que la red se ha implementado. Los sistemas de pruebas 5G escalables con servicios de datos integrados son necesarios para medir el rendimiento completo de la red y simular el comportamiento de los usuarios en el mundo real en los ensayos de campo de la tecnología. Necesario es, por tanto, un software capaz de emular y medir millones de flujos de datos únicos, para mejorar las pruebas de carga y capacidad, y las funciones basadas en parámetros de referencia.

b) Fase 2: implementación, activación y ampliación.

Para obtener el máximo beneficio en esta fase de implementación, es necesario disponer de los máximos y mejores elementos y herramientas, como los analizadores de estaciones base aumentados para analizar el espectro y la interferencia de señales 5G en el rango de la onda milimétrica. El software para monitorizar y garantizar el rendimiento de la red, así como para verificar los acuerdos de nivel de servicio (SLA), puede incrementar la activación de la tecnología 5G, la monitorización del rendimiento y las actividades de solución de problemas.

c) Fase 3: garantía, optimización y monetización.

Una vez se hacen efectivas las fases anteriores se puede obtener el máximo beneficio económico a través de esta tecnología, por la cantidad de utilidades que nos pretende proporcionar. Por este motivo, la tecnología 5G se basa también en una gran transformación empresarial. Disponer de estos servicios, tales como la alta definición, juegos de realidad virtual, o aplicaciones de IoT, entre otros, implica aplicar especial atención en la calidad de experiencia (QoE) del cliente.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO REAL

Para llevar a cabo este apartado de manera satisfactoria se utiliza la herramienta XIRIO Online [36], que permite analizar el impacto del despliegue de una red móvil 5G en un punto determinado. Esta aplicación es utilizada por operadoras como Vodafone en el proceso de simulaciones de diferentes estaciones base, pero en su versión avanzada. En este trabajo se utiliza la versión gratuita, que presenta algunas limitaciones en cuanto a la resolución de las simulaciones y parámetros de red.

Como se comenta en capítulos anteriores, necesitamos equipos que transmitan y reciban las señales que contendrán los diferentes datos que, tras ser procesados, llegarán al usuario final. Como norma general, las estaciones base que transmiten señal 5G también transmiten señales como 4G, 3G y 2G. Esto quiere decir que en una estación de estas características contamos tanto con antenas pasivas como con antenas activas (las que transmiten señal 5G independiente). Para el estudio que se va a realizar no es necesario incluir ninguna diferente a las antenas 5G, aunque es conveniente comentar la situación del emplazamiento en un entorno real.

En el caso de las antenas pasivas, podemos encontrarlas con más o menos bocas, en función del número y tipo de RRUs que vayan a conectarse a ellas, lo cual depende de las frecuencias que vayan a transmitir. Teniendo en cuenta que las RRUs suelen tener habitualmente 2 o 4 bocas, antenas pasivas con 12 bocas como las ASI4517R12v06 son oportunas, ya que si no se ocupan todas las bocas pueden quedar libres de conexión, y de esta manera pueden ser transmitidas todas las señales (2G, 3G, 4G, 5G), por ejemplo, a través de 1 RRU tribanda que transmita las bajas frecuencias (700 MHz, 800 MHz y 900 MHz) y 1 RRU que transmita las frecuencias de 1800 MHz para 4G.

Por otro lado, sabiendo que las antenas activas son un tipo de antenas que llevan incorporada las funciones de procesamiento de señal que realizan las RRUs, el número de bocas se reduce a 2 e irán directamente conectadas a la BBU5900 para el análisis de datos. Cabe destacar que ese tipo de BBU es el que se usa principalmente para las señales de 4G y 5G, aunque recientemente se está posibilitando incluir la gestión de 2G y 3G a partir de este modelo.

4.1. FASES DEL DESPLIEGUE SOBRE UN ESCENARIO REAL

Como punto de análisis, se va a situar la estación base en la azotea del Hospital de Fuenlabrada, ubicación cercana al campus de la Universidad Rey Juan Carlos y que pueda servir como punto referencial para el radio de cobertura, como podemos ver en las Figuras 43 y 44.

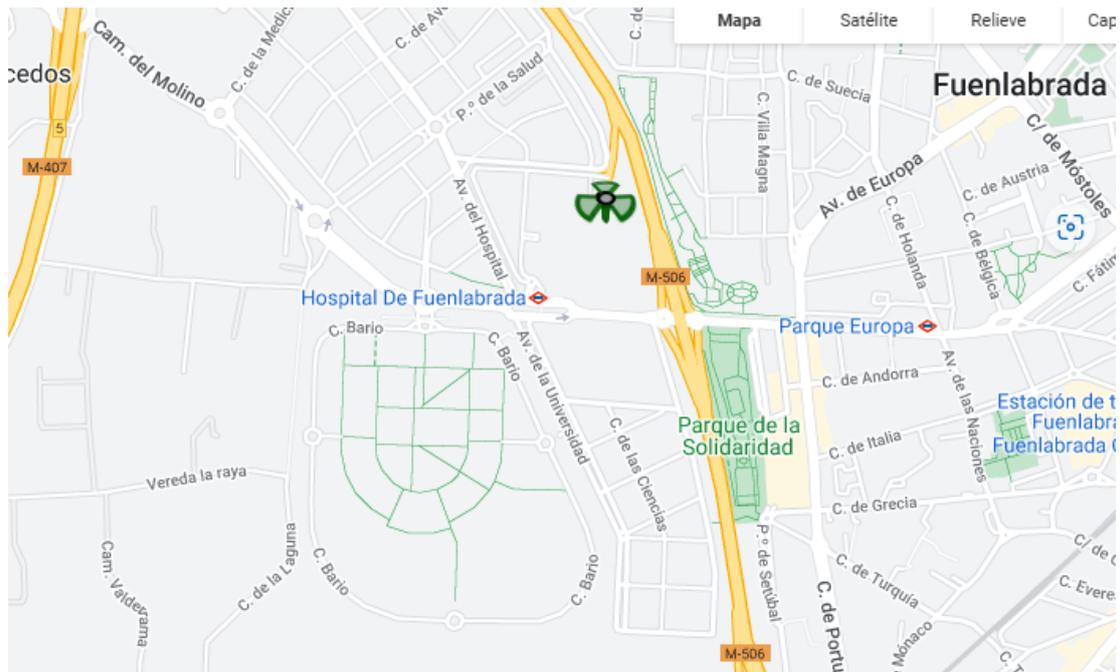


Figura 43. Vista en modo mapa de la estación base.

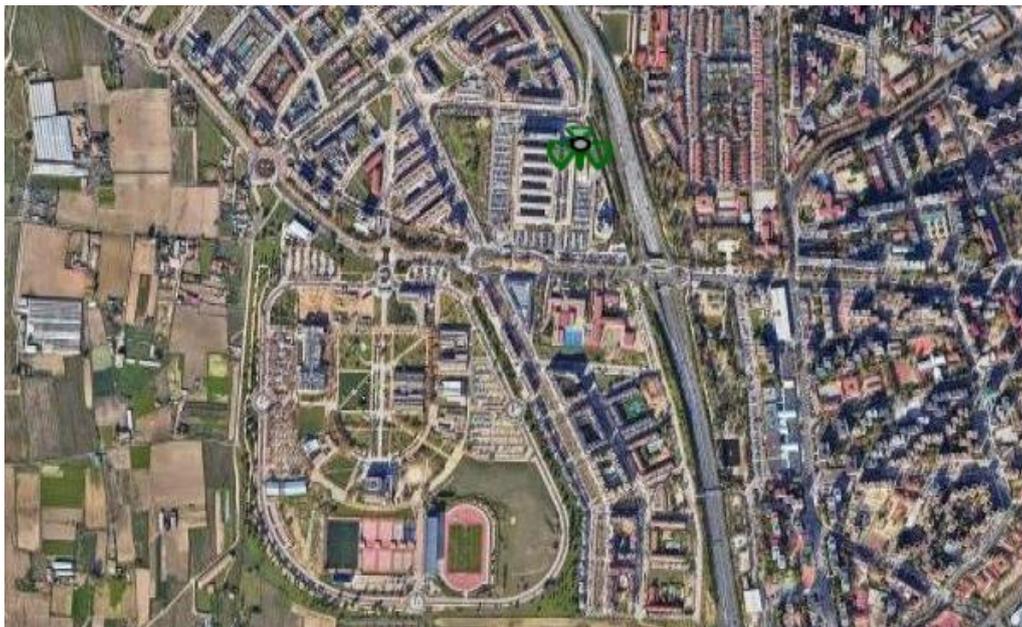


Figura 44. Vista en modo satélite de la estación base.

Como se ha visto en el capítulo 2, la banda de referencia para el 5G se encuentra en torno a la frecuencia de 3,5 GHz. Esta es la banda que se usará en este capítulo para el estudio de despliegue de la red 5G, con las características que se pueden observar en la Figura 45. Se trabaja en FDD, con una separación entre portadoras de 20 MHz. Al tramo inferior le corresponde una frecuencia inicial de 3500 MHz y una frecuencia final de 3600 MHz, mientras que el tramo superior lo constituye una frecuencia inicial de 3600 MHz y una frecuencia final de 3700 MHz. Ambos tramos constan de 100 MHz de ancho de banda, respectivamente.

Propiedades de la Banda de Frecuencias

Banda ★

Nombre: Banda 5G

Descripción 1:
Banda 5G - 3500MHz

Descripción 2:

Color: 

Parámetros de la banda

Ancho de canal / Separación entre portadoras: 20 MHz

Ordinal del primer canal: 1

Tramo inferior:

Frecuencia inicial: 3500 MHz

Frecuencia final: 3600 MHz

Frecuencia primera portadora: 3510 MHz

Tramo superior:

Frecuencia inicial: 3600 MHz

Frecuencia final: 3700 MHz

Frecuencia primera portadora: 3610 MHz

Canales prohibidos:

Canales prioritarios:

Introduzca una lista de canales separados por comas y/o intervalos de canales (Ejemplo: 2, 2', 5-7, 12'-21').

Figura 45. Propiedades de la Banda de frecuencias.

A continuación, se procede a elegir un sector y se le da ciertas características que determinarán el ángulo de incidencia de las antenas 5G, situadas en la azotea del edificio como se indica en la Figura 46. Se escogen como antenas unas que incorpora por defecto el programa, cuyas características indican validez para 5G. Se indica una altura de las antenas con respecto al nivel del suelo de unos 30 metros, parámetro que junto con los ángulos de inclinación determinarán el área de cobertura y la incidencia de las señales.

Se observa también la frecuencia de transmisión previamente establecida y una potencia de 20W para la antena.

Emplazamiento

Emplazamiento:

Coordenadas

Latitud:

Longitud:

Parámetros de radio

Tipo sistema:

Antena:

Altura antena: m

Orientación: °

Inclinación mecánica: °

Inclinación eléctrica: °

Referencia de alturas de antenas

Alturas respecto a:

Usar altura de edificio:

Altura edificio: m

Frecuencias de transmisión

Frecuencias	Canal
3510.000 MHz	9

Polarización:

Feeder:

Longitud del feeder: m

Pérdidas del feeder: dB

Pérdidas pasivos: dB

Potencia: W

RSRP: W

Figura 46. Parámetros de radio.

En la siguiente Figura 47, se muestran los parámetros 5G establecidos. Muchos de estos parámetros no son relevantes para este estudio por lo que se han dejado con sus valores por defecto. En la configuración de TDD se marca como no para especificar que se trabaje en FDD, y en Satnd Alone, verificando así que nuestras antenas 5G no tendrán dependencia del LTE para emitir, sino que en su estado más puro se recibirá la señal 5G. Así, se indican los parámetros MIMO, con una elección de 4x2 en downlink y de 2x4 en uplink, lo que se puede resumir como ejemplo en que 4 dispositivos se conectan a 2 antenas individuales (introducidas dentro de la antena 5G), y estas mismas 2 antenas retornan información a los 4 dispositivos.

Parámetros 5G

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/cobertura de toda la red 5G

Planificador: Proportional Fair

Configuración de TDD: No

Stand alone: Stand Alone

Umbral de agregación: 5 dB

Numerología (μ): 1

Offset de potencia SS-RSRP: 0 dB

Configuración PRACH:

Categoría del preámbulo: Largo

Número de preámbulos PRACH: 64

Zero correlation zone: 0

Número de RS necesario: 1

Configuración ICIC:

Tipo ICIC de red: Estático

Distribución potencia por ICIC: Frequency reuse factor 1

Considerar ICIC en la estación

Parámetros Downlink:

Carga de tráfico: 50 %

Símbolos PDCCH: 2

Ocupación de PDCCH: 10 %

MIMO DL: MIMO 4x2

SINR mínima para MIMO: 8.5 dB

Tipo de ganancia MIMO DL: Fija Variable Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO DL: 1.48

Parámetros Uplink:

Incremento de ruido: 3 dB

Factor de ruido: 2 dB

Alfa (control de potencia): 1

P0 (control de potencia): -90 dBm

MIMO UL: MIMO 2x4

Tipo de ganancia MIMO UL: Fija Variable Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO UL: 1.48

Figura 47. Parámetros 5G.

A continuación, se deben establecer los parámetros de cálculo. En este caso, para el método de propagación XIRIO ofrece una amplia gama de opciones según las necesidades. En este caso, se usa el *New York University*, método creado por esta universidad válido para el estudio de redes 5G en función de las frecuencias de transmisión. En este ejemplo, se marca la opción de no aplicar la penetración en edificios, por lo que se considerarán aquellos dispositivos que reciban incidencia directa (ver Figura 48).

Propiedades del Método de Cálculo

Método de cálculo

Nombre:

Método de propagación:

Resolución: m/pixel

Limitar la distancia máxima del cálculo

Límite: m

Parámetros básicos

Cálculo automático de factor K

Factor K:

Usar margen de desvanecimiento desde clutter

Margen de desvanecimiento: dB

Propiedades de New York University

Dependencia con la altura de antena de estación base:

Sin dependencia
 Con dependencia

Penetración en edificios

No aplicar
 No calcular en edificios
 Calcular sólo en azoteas
 Pérdidas fijas en edificios
 Receptor ubicado en el interior del edificio

Pérdidas fijas: dB

Tipo de cálculo:

Pérdidas horizontales: dB/m

Pérdidas verticales: dB/piso

Metros por piso: m

Receptor ubicado en el piso:

Si la altura del receptor es mayor que la del edificio se considerará que el receptor está ubicado en la azotea.

Figura 48. Propiedades del método de cálculo.

Recurriremos a la creación de un rango de colores (ver Figura 49) necesario para la representación del nivel de la señal que incide sobre un área del terreno a una distancia determinada. Estos datos parten de la relación entre dBm y la intensidad de la señal, exclusivos para 4G y 5G.

En primer lugar, para determinar la intensidad y potencia de la señal que reciben los dispositivos se recurre a parámetros como dBm o asu:

- El término dBm es una unidad de medida logarítmica usada en comunicaciones para indicar la potencia. Deriva de decibelios (dB) relativos a un milivatio (mW). Siempre tendrá un valor negativo y para señales 2G los valores suelen ir desde -51 a -113 , siendo mejor la señal cuanto más cerca está de cero.
- El término asu (del inglés, *Arbitrary Strength Unit*) se refiere a la unidad de medida empleada para expresar la fortaleza de la señal móvil, cuyo valor es proporcional a la fuerza de la señal. Valor positivo cuyos valores suelen comprenderse entre 31 y 0, siendo peor la señal cuanto más se acerca a cero.

La relación entre ambos es el siguiente: $\text{dBm} = 2 \times \text{asu} - 113$; $\text{asu} = 113 - \text{dBm}/2$

Gracias a estos términos se puede entender mejor en rango de valores que indicará el nivel de señal recibida, valores que varían según la señal recibida, siendo principalmente usado el dBm.

Para señales 2G, el nivel de señal se puede identificar en el teléfono con las 5 barras que representan la cobertura que éste tiene y sus valores aproximados suelen comprenderse entre los siguientes rangos:

Entre -51 hasta -79 dBm tenemos una señal excelente = 5 barras

Entre -80 hasta -88 dBm tenemos una señal buena = 4 barras

Entre -89 hasta -95 dBm tenemos una señal regular = 3 barras

Entre -96 hasta -104 dBm tenemos una señal mala = 2 barras

Entre -105 hasta -112 dBm tenemos una señal pésima = 1 barras

Para señales 3G, se usan los nuevos términos RSSI (fortaleza total de la señal, incluyendo la interferencia y la señal de otras torres cercanas) y RSCP (siglas en inglés de *Received Signal Code Power*), que es el nivel de señal que es procesada por el móvil, expresada en dBm y es la que realmente se debe tomar para estimar la intensidad de la señal que se recibe. Los valores son:

Entre -50 hasta -75 dBm tenemos una señal excelente

Entre -76 hasta -90 dBm tenemos una señal buena = 4 barras

Entre -91 hasta -100 dBm tenemos una señal regular = 3 barras

Entre -101 hasta -120 dBm tenemos una señal mala = 2 barras

Para señales 4G y 5G, los valores varían en función de los parámetros RSRP (del inglés *Reference Signal Received Power*), que es la intensidad de la señal que llega al móvil de la celda o torre a la que está conectado y RSRQ (del inglés *Reference Signal Received Quality*), el resultado de RSRP entre RSSI. Los valores son:

Entre -75 hasta -88 dBm tenemos una señal excelente

Entre -89 hasta -96 dBm tenemos una señal buena

Entre -97 hasta -105 dBm tenemos una señal regular

Entre -96 hasta -104 dBm tenemos una señal mala

Entre -105 hasta -112 dBm tenemos una señal pésima

El rango de colores usado en este caso será el correspondiente para 5G.



Propiedades del rango de colores

Rango de colores ★

Nombre: 5G

Rangos

Color	Rango	Descripción		
	[-125.00 , -112.00)	Pésima		
	[-112.00 , -105.00)	Mala		
	[-105.00 , -96.00)	Regular		
	[-96.00 , -88.00)	Buena		
	[-88.00 , Infinity)	Excelente		

Visualizar ambos ▼

Aceptar Aplicar Recargar Cancelar

Figura 49. Rango de colores en representación del nivel de la señal 5G.

Como consiguiente, se le aplican diferentes colores a cada rango, los cuales serán los indicadores en la representación visual del nivel de señal que se puede percibir en cada punto del espacio en el que se realiza el estudio, siendo el verde una señal excelente con la que el flujo de intercambio de datos sería veloz y sin interferencias; el azul una señal buena y eficaz, en la que las interferencias serían mínimas; el naranja una señal regular, la cual mantendría el intercambio de datos pero provocaría algunos parones y pequeñas pérdidas de conexión; el rojo una mala señal que perjudica el intercambio fluido de datos y se ampliarían los problemas de conectividad; el blanco una señal pésima, nivel más bajo donde no se hace efectiva la transmisión de señales.

Como ampliación a la información del área de interés a calcular, pueden ser usadas a modo de guía las pestañas de información que aparecen en la barra de herramientas de Xirio, ya que nos puede ser útil en caso de querer modificar las dimensiones del área mencionada (véase Figura 50).



Figura 50. Rango en el que se realiza el estudio.

Una vez ubicada la estación base, se han definido tres sectores y se han configurado los valores estimados en el cálculo del estudio y se observa en primer lugar la representación del nivel de señal (véase Figura 51). Se observa, por tanto, cómo los colores indican la caída de la señal en cada punto dentro del area de cobertura estimado, acorde a lo explicado anteriormente tras la asignación del rango de colores. También se observa como varía el nivel de señal en función del azimut de la antena y su ángulo de incidencia.

Las estaciones base 5G deben dar cobertura aproximadamente a una región de 1 km², ya que, al trabajar con frecuencias más altas, las distancias se acortan. Como resultado, se crean más estaciones base a menores distancias, con el objetivo de cumplir así el propósito de menor latencia y mayor velocidad. Gracias al rango de colores creado previamente podemos diferenciar las zonas de incidencia de la señal y su nivel en cuanto a mayor o menor incidencia.

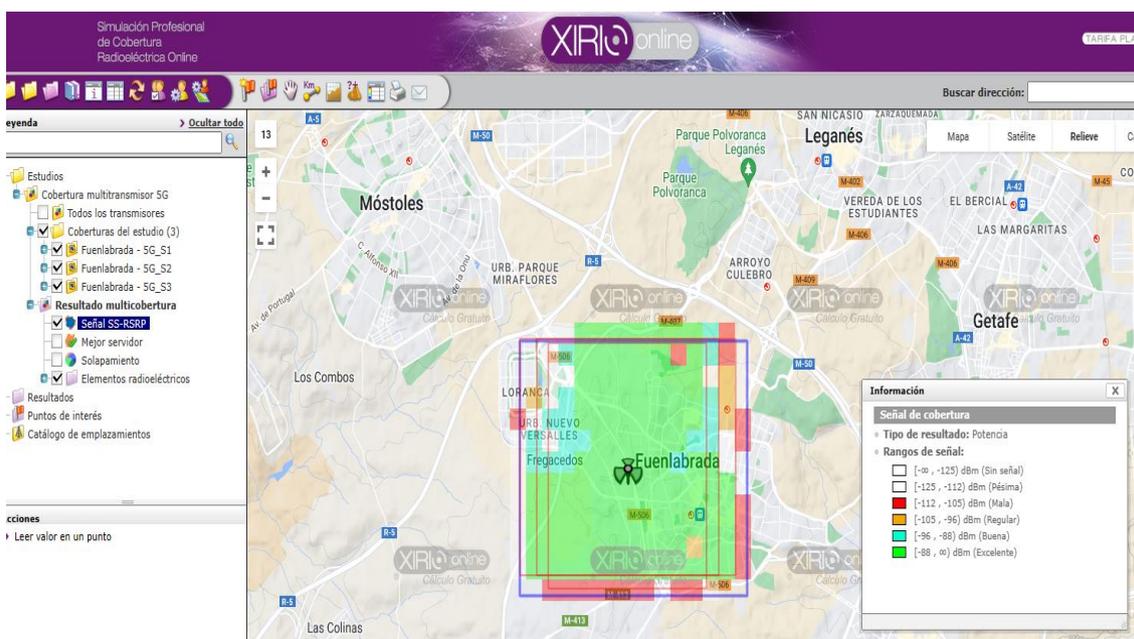


Figura 51. Niveles de potencia de la señal.

Del cálculo del estudio realizado podemos analizar cuál sería el mejor servidor según el ángulo al que se esté dirigiendo nuestra señal, como se ve en la Figura 52:

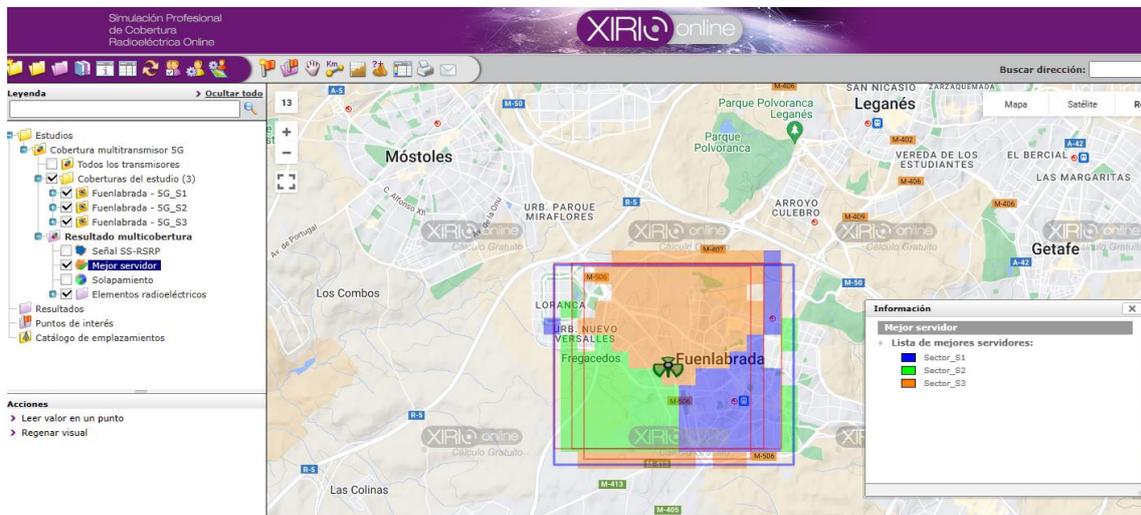


Figura 52. Análisis de mejor servidor.

Podemos observar en la Figura 53, la representación del nivel de solapamiento de los servidores que ofrece este estudio. Este solapamiento nos indicará el número de servidores habilitados para cada punto de interés. Como podemos observar, el color violeta indica que encontraremos 3 o más servidores, lo que indica el buen nivel de señal que encontraríamos en las zonas coloreadas de esta manera. Por el contrario, a medida que nos alejamos de nuestra antena el número de servidores va disminuyendo y con ello la señal se hará cada vez menor.

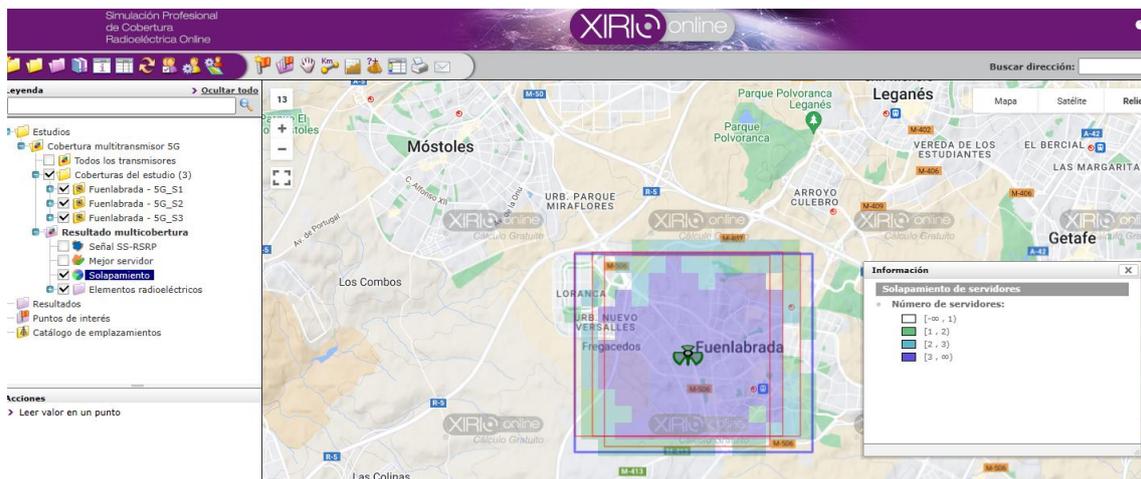


Figura 53. Solapamiento.

Con los datos obtenidos podemos concluir que sería una buena ubicación para nuestra estación base, ya que nos cubre con buena señal los principales puntos de interés en los que mejor cobertura debe de haber, sean estos el Hospital de Fuenlabrada y la Universidad Rey Juan Carlos. Es cierto que esta señal se extiende a un rango más amplio, aunque es necesario destacar que sería conveniente ubicar nuevas estaciones base a unas distancias lo suficientemente

apropiadas para dejar cubiertas las zonas en las que la señal se iba haciendo más débil, partiendo de nuestra estación base.

También cabe recordar y diferenciar el tipo de operadora presente en este emplazamiento, es decir, si bajo las antenas instaladas operan Vodafone y Orange, serán estas las que disfrutarán de la mejor cobertura en estas zonas de excelente señal. En cambio, si no se incluye a Telefónica y esta no tiene antenas cerca que transmitan esta señal 5G, sus usuarios no disfrutarán de la red 5G si no que su señal se limitará a aquella señal que alcance a recibir, ya sea 4G o 3G/2G, pudiendo darse el caso de no tener cobertura en ciertos puntos en los que no llegue señal de ninguna estación base cercana.

A partir de este análisis, procedemos a realizar los trámites comentados en el capítulo 3 que nos llevarían a la instalación de los equipos para su puesta en funcionamiento real, ya sea el replanteo, la propia instalación de los equipos y las pruebas de calidad finales.

CAPÍTULO 5

EJEMPLOS DE USO DE LA RED 5G

Los avances tecnológicos que la tecnología 5G ha hecho posibles fueron en su momento pura ciencia ficción. Los coches autónomos, los juegos de realidad virtual, las “ciudades inteligentes” y el IoT son ejemplos de los adelantos futuristas con una gran ventaja ante las mejoras de ancho de banda y latencia que la tecnología 5G supone. Como ocurre con cualquier avance de capacidad funcional, el potencial ilimitado de la tecnología 5G generará más creatividad y una continua búsqueda en la creación de nuevas aplicaciones. Veamos en detalle alguno de estos avances:

Coches autónomos

La conducción habitual implica que una persona, con una correcta predisposición en cuanto a sentidos de la vista y del oído principalmente, se sitúe tras el volante del coche y lo maneje de manera adecuada, identificando las señales de tráfico y realizando una correcta conducción para respetar las normas de conducción vial. Si bien podríamos actuar de manera temeraria conduciendo por una carretera monótona sin la sujeción del volante y atribuir a esta acción la denominación de conducción autónoma del vehículo, éste sería un acto inmoral, en tanto que sería objeto de multa y que necesitaríamos en algún momento sujetar el volante para evitar la alta probabilidad de accidentes.

En la búsqueda de comodidad, surgió la idea de los vehículos de conducción autónoma, buscando relación con la opción del piloto automático en los vehículos aéreos. Estos automóviles cuentan con innumerables sensores, tanto internos como externos, que se apoyan en tecnologías como el radar, láser, visión por cámaras y sistemas de posicionamiento, como el GPS, para no solo determinar la ruta, sino que también son capaces de interpretar las señales de tráfico o de identificar obstáculos, tales como vehículos que reduzcan la velocidad o cambien de carril, personas cruzando la calle y otros peligros (ilustrado en la Figura 54). Además, los sensores incorporados, sobre todo los externos, pueden identificar paradas de autobús o señales de tráfico para adaptarse a las condiciones de la vía.

Para obtener una respuesta instantánea a las diferentes situaciones que se pueden dar durante la conducción, el 5G cobra gran importancia. Con su tecnología de baja latencia se podrán obtener unos tiempos de respuesta instantáneos. El objetivo debe ser utilizar esta tecnología para poder reducir al máximo posible los fallos del sistema y evitar así accidentes con coches autónomos, como le sucedió en Estados Unidos a un conductor de los famosos coches Tesla, según explica Tim Lewin en su artículo *“Por primera vez, un conductor de Tesla se enfrenta cargos penales por un accidente mortal en el que Autopilot estaría involucrado”* [30].

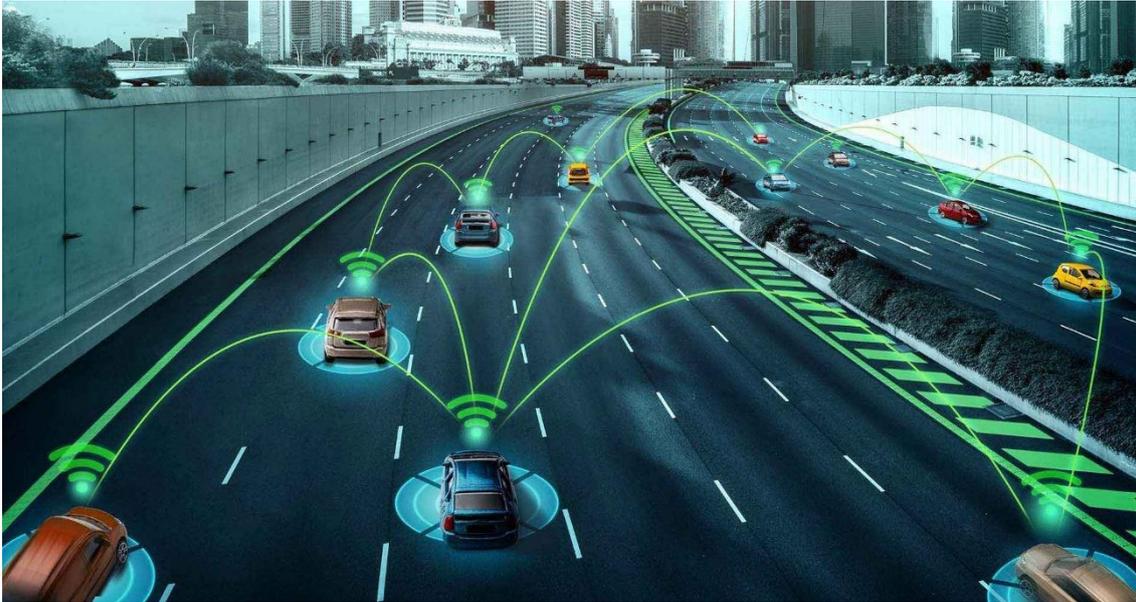


Figura 54. Impacto del 5G en coches autónomos. [31].

Retransmisión de eventos

La retransmisión televisiva de cualquier tipo de evento presentará grandes avances de cara al futuro próximo. Uniendo 5G y la inteligencia artificial se pretende lograr una realización automatizada de los eventos. Esto será posible gracias a que, mediante tarjetas 5G, las cámaras no necesitarán de cableado para recoger la información y, además, retransmitirán imágenes de muy alta calidad, en calidad 4K, 8K o tecnologías posteriores, y hacia distintos aparatos tan comunes como el teléfono, la tablet o los ordenadores. En este caso, la calidad de la imagen llegaría sin pérdida hasta el aparato receptor del contenido pudiéndose transmitir a través de Internet, gracias a su mínima latencia, lo que dejaría atrás la preocupación de los operadores por la compresión del vídeo enviado.

Además, las cámaras pueden evitar la saturación de la red. Hacer la grabación de un evento de grandes magnitudes con 4G no es la mejor opción, porque la tasa de transferencia de los datos es menor y la latencia, superior. Otro dato destacado es que la red aguanta un cierto número de dispositivos conectados simultáneamente. Pero 5G es capaz de elevar esta cifra al millón de dispositivos por kilómetro cuadrado.

De entre las ventajas nombradas, como son la baja latencia, la reproducción en alta calidad o las facilidades de uso, es importante destacar otra de las ventajas que este hecho proporciona, como es la reducción de costes, pues se evitaría el desplazamiento de vehículos excesivos y la gran cantidad de cableado para su correcto funcionamiento sería prescindible.

Operaciones 5G

En febrero de 2019, en el *Mobile World Congress (MWC)*, celebrado en Barcelona, Vodafone propulsó un proyecto conocido como cirujano remoto, en el que se producía la primera operación quirúrgica teleasistida mediante 5G [32].

Gracias a la tecnología 5G, un cirujano especialista guía, sin estar físicamente presente y en tiempo real, a otro cirujano que esté operando en cualquier quirófano del mundo. Gracias a

esto, es posible hacer una transferencia de conocimiento práctico en momentos críticos. La baja latencia (el 5G la reduce a 1 milisegundo) que presentan las comunicaciones con 5G permite que la operación se transmita en tiempo real, sin retardos, lo cual resulta ser el hecho más importante en este ámbito.

El cirujano remoto puede entonces dar recomendaciones o sugerencias realizando indicaciones directas sobre la imagen real de lo que sucede en el quirófano situado a gran distancia, ya sea a través de una pantalla táctil o dibujando con su ratón, colaborando activamente y en tiempo real en la toma de decisiones de todo el procedimiento

Este hecho promueve la presentación de servicios médicos en aquellos lugares donde la distancia sea un factor crítico. Así, resulta más fácil ofrecer servicios que son entregados por profesionales médicos mediante equipos de telecomunicaciones y tecnologías de la información, tratando de interactuar con el paciente y obtener información de él, con el objetivo de prevenir y curar enfermedades, lesiones, y ofrecer educación. Esto permite convertir cualquier quirófano del mundo en remoto, con la involucración de los cirujanos y la infinita posibilidad de tomar decisiones quirúrgicas colaborativas, algo inviable antes del 5G.

De este modo, el viajero que adquiere un seguro de viaje con asistencia puede elegir entre ser atendido de forma tradicional o remota, con lo que el usuario podrá intercambiar pruebas diagnósticas, informes o teleconsulta, todo ello con independencia del idioma y del país, según datos de AXA Partners.

En la Figura 55 se muestra un ejemplo del futuro de las operaciones médicas posibilitada por la implantación del 5G.



Figura 55. Evolución médica gracias al 5G [32].

Sector ferroviario

En octubre de 2021, Adif Málaga y Vodafone se unieron para desarrollar casos de aplicación del 5G en la estación de tren malagueña, que ha servido como banco de pruebas para testar la idoneidad de esta tecnología aplicada a entornos como estaciones de viajeros [33]. El objetivo principal del proyecto consistía en descubrir nuevas maneras de gestionar los servicios de la estación de forma más eficiente, ofrecer servicios adecuados a las necesidades de todos los clientes, así como servicios de valor añadido a los distintos grupos de interés, y poder atribuir a la estación el concepto de “lugar inteligente” dentro de la ciudad, conectado con servicios externos. En este proyecto se muestran las siguientes innovaciones:

- Acceso biométrico transparente de viajeros a la sala de embarque: posibilidad del viajero para acceder a la zona de embarque mediante un reconocimiento facial de factor único (validación de su biometría facial previamente registrada) o un reconocimiento de doble factor (validación del billete y la biometría facial presentando un código Aztec), aportando así seguridad y fluidez en el acceso.
- Registro digital del personal ferroviario, realizado mediante un reconocimiento facial de factor único o de doble factor, en este último caso presentando un código QR personal. Del 5G se aprovecha su ancho de banda y baja latencia para transmitir imágenes con la calidad necesaria en tiempo real, eliminando el cableado.
- Mejora del servicio Wifi en la estación de tren de Málaga: se comprueba su funcionalidad si se conectaran un mayor número de dispositivos, que mediante el 5G dispondrían de una mayor velocidad de conexión.
- *Building Information Modeling*: metodología que permite diseñar los edificios en 3D superponiendo capas, de tal modo que se pueda compartir información y mejorar la calidad del diseño para garantizar la usabilidad de las instalaciones.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. CONCLUSIONES

Las comunicaciones han ido cambiando en función de las necesidades de cada generación, resultando en una evolución de las telecomunicaciones con las consiguientes innovaciones en el hardware y software de sus tecnologías. Estos constantes cambios han derivado en un incremento en el tráfico de las redes interconectadas, es decir, mayor cantidad de dispositivos conectados, mayor latencia y mayor consumo de baterías, lo que producía inestabilidad en las comunicaciones.

El despliegue de esta nueva tecnología 5G supone un nuevo enfoque de innovación y avances tecnológicos que alcanzarán cada vez más reconocimiento en los años venideros. En cuanto la tecnología 5G SA esté totalmente operativa, no solo contaremos con una mayor conectividad entre dispositivos y una mejora perceptible en la calidad del contenido audiovisual gracias a las mejoras en la resolución y la disminución de la latencia, sino que dará paso a nuevas experiencias y sectores que hasta ahora no se habían podido llevar a cabo debido a las limitaciones de anteriores tecnologías.

Con respecto a las especulaciones sobre los riesgos a la salud, se puede transmitir tranquilidad a la población. Los niveles de radiación que pudieran considerarse perjudiciales se reducen, en gran medida, por la ubicación en la que se suelen situar las antenas y resto de equipos. Dado que suelen situarse principalmente en la azotea de edificios o en lo alto de torres, se reduce así los niveles de exposición a estos equipos, siendo cierto que sería necesaria una presencia muy cercana y continuada a los mismos, estando en funcionamiento, para poder considerar riesgo.

Además, en los trabajos de despliegue, la aplicación de las medidas preventivas es necesaria tanto para la protección del personal instalador como para asegurar el correcto estado de la estación base.

En cuanto a los casos de estudio en escenarios reales, se ha podido llevar a cabo un estudio de radio de cobertura que, una vez validado acorde a los resultados esperados, conduce a la elección óptima de la estación base que cubrirá las necesidades.

En la actualidad, se observa el acelerón que se está aplicando a estos proyectos de despliegue de redes 5G, donde se amplía la operatividad del 5G en su estado más independiente, el 5G SA. El futuro tecnológico que nos depara se presenta prometedor y el desarrollo de las *mmWave* de manera adecuada propulsarán estas innovaciones.

6.2 LÍNEAS FUTURAS

Ya se ha comentado, a lo largo de todo este Trabajo de Fin de Grado, la importancia que tiene el buen desarrollo y optimización de las ondas milimétricas. Cabe recordar que sus mayores frecuencias implican puntos positivos, como una transmisión de datos muchísimo más rápida, y puntos negativos, como la dificultad de penetración de las ondas en edificios y otros elementos similares. Mayor capacidad en espacios de concentración de masas como estadios, aeropuertos o estaciones de tren, es un punto muy positivo para mejorar la conectividad simultánea de dispositivos electrónicos a la red móvil que, en muchas ocasiones, necesitan descargar un gran volumen de datos. Además, con la consolidación del teletrabajo, será en esos escenarios donde más beneficio se podrá observar.

Como añadido, y para ponerle fin a este trabajo, quisiera exponer mi visión sobre el futuro próximo que nos depara, y no puede ser de otra forma que usando como referencia a una de las sagas más famosas actualmente en la historia del cine, como es Fast and Furious.

Aunque Fast and Furious es una saga de actualmente 9 películas que trata sobre el mundo de los coches, las carreras ilegales y el concepto de familia, se van introduciendo durante la trama tecnologías cada vez más avanzadas. Este hecho nos sitúa en la película número 7, o Fast 7 (2014), en el que se introduce una herramienta que denominaron El ojo de Dios. Esta herramienta es un artefacto de piratería que incorpora un software de diminuto tamaño capaz de piratear cualquier tipo de tecnología utilizando una cámara y seguimiento por satélite. Recopila información que queda a disposición del usuario, como localizar a cualquier persona a grandes distancias, en tiempos considerablemente bajos. Este proceso consiste en introducir características de un determinado individuo, como su nombre, el software analiza todas las bases de datos disponibles en busca de la máxima información posible, se conecta a todos los dispositivos existentes que contengan una cámara y realiza un seguimiento de cada paso que esa persona ha ido siguiendo hasta dar con su paradero (ver Figura 56).

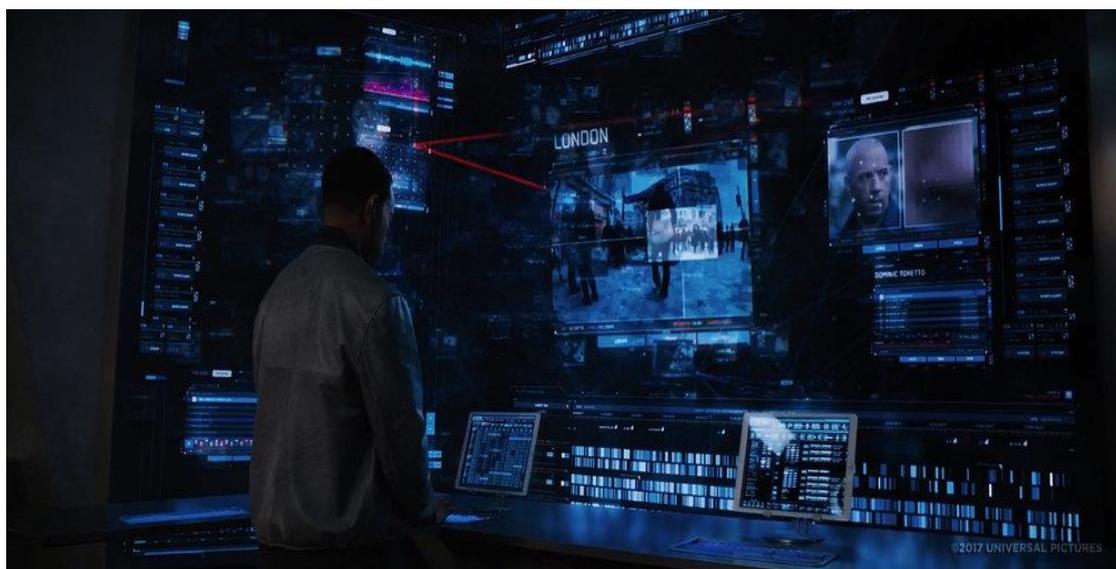


Figura 56. El ojo de Dios.

Teniendo en cuenta la magnitud de rendimiento que ello conlleva, funciona mejor estando cerca de su objetivo para identificarlo.

Más adelante, en Fast 8 (2017), vemos una evolución más amplia de este artefacto, capaz de controlar de manera remota automóviles estacionados o en funcionamiento que incorporan algún tipo de chip, con mayor influencia en coches autónomos. En este caso, los tiempos de respuesta son menores, lo que implica que las acciones que se aplican se realizan de manera prácticamente instantánea.

Con todo lo expuesto en este trabajo es inevitable relacionar El Ojo de Dios, con la tecnología 5G en su versión SA, la Inteligencia Artificial o el Edge Computing entre otros. Dada la fecha de introducción de este mecanismo en Fast 7, observamos que, aun siendo una película, nuestra imaginación alcanza dimensiones indescriptibles y realidades que en primera instancia se asumen como imposibles, pero que, con la habilidad humana para hacer posible lo imposible, ya se visualizaban unos avances tecnológicos que hoy en día se supone que siguen en desarrollo.

Pero siempre hay margen de mejora, ya que el considerable crecimiento de los datos centralizados y las redes inalámbricas 5G autónomas de la industria no serán capaces de satisfacer sus demandas en el futuro. Por lo tanto, necesitamos avanzar en la nueva tecnología de red inalámbrica que se llama 6G [34]. La red inalámbrica 6G traerá nuevas alturas en las generaciones móviles, ya que incluye:

- (i) comunicación masiva de persona a máquina.
- (ii) conectividad ubicua entre el dispositivo local y el servidor en la nube.
- (iii) creación de tecnología de fusión de datos para diversas experiencias de realidad mixta y mapas multiverps.
- (iv) Centrarse en la detección y el accionamiento para controlar la red de todo el mundo.

La red móvil 6G ofrecerá nuevos servicios con algunas otras tecnologías; estos servicios son mapeo 3D, dispositivos de realidad, hogares inteligentes, wearable inteligente, vehículos autónomos, inteligencia artificial y sense. Se espera que 6G proporcione comunicación de ultra largo alcance con una latencia muy baja de 1 ms. La velocidad de bits por usuario en una red inalámbrica 6G será de aproximadamente 1 Tbps, y también proporcionará comunicación inalámbrica, que es 1000 veces más rápida que las redes 5G.

Por tanto, viendo la evolución tecnología que estamos alcanzando, y con la pronta puesta en órbita de satélites para dar servicio a todos los usuarios, no resultaría extraño poder desarrollar una herramienta de semejante magnitud, o mejorarla en caso de que ya exista.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Montes, C. (21/02/2021). *Debuta en 2022: los seis grandes beneficios tecnológicos que traerá el 5G en Chile*. La Tercera. Obtenido en: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/debuta-en-2022-los-seis-grandes-beneficios-tecnologicos-que-traera-el-5g-en-chile/RRAE5QW6GZHD5BBG5RN3AWFKCQ/>
- [2] Gombi, M. (s.f), *Semina 2*, pp. 2-9. Obtenido en: https://www.academia.edu/9501057/Semina_2
- [3] *¿Qué es 5G?* (2022). Cisco. Obtenido en: https://www.cisco.com/c/es_mx/solutions/what-is-5g.html
- [4] *Presentando la tecnología y redes 5G (definición, características, 5G vs 4G y casos de uso)*. (2024). Thales Group. Obtenido en: <https://www.thalesgroup.com/es/countries/americas/latin-america/dis/movil/inspiracion/5g>
- [5] Collado, C. (14/09/2020). *Todas las diferencias y compatibilidades entre el 5G NSA y el 5G SA*. La Vanguardia. Obtenido en: <https://andro4all.com/tecnologia/todas-las-diferencias-y-compatibilidades-entre-el-5g-nsa-y-el-5g-sa>
- [6] Kavanagh, S. (17/09/2022). *What is 5G New Radio (5G NR)*. Obtenido en: <https://5g.co.uk/guides/what-is-5g-new-radio/>
- [7] *Implementación de redes 5G*. (2022). Viavi Solutions. Obtenido en: <https://www.viavisolutions.com/es-es/implementacion-de-redes-5g>
- [8] Flores, J. (2022), *Qué es el 5G y cómo nos cambiará la vida*. National Geographic España. Obtenido en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-es-5g-y-como-nos-cambiara-vida_14449
- [9] Soriano, D. (2021). *Cómo saber si la TDT se verá mal en tu casa por culpa del 5G*. ADSL Zone. Obtenido en: <https://www.adslzone.net/noticias/streaming-tv/contacto-tdt-se-ve-mal-5g/#:~:text=C%C3%B3mo%20afecta%20el%205G%20a%20la%20TDT&text=En%20estos%20casos%2C%20se%20pueden,de%20televisi%C3%B3n%20pueda%20verse%20afectada.>
- [10] *Filtros LTE 5G / LTE2*. (2024). Tdt profesional. Obtenido en: <https://www.tdtprofesional.com/es/tdt/distribucion-y-accesorios/filtros-5g-tdt-lte2.html>

- [11] *Arquitectura de las redes 5G. Núcleo de red, redes RAN y arquitectura de seguridad para la tecnología 5G.* (s.f). Viavi Solutions. Obtenido en: <https://www.viavisolutions.com/es-es/que-es-la-arquitectura-de-la-tecnologia-5g>
- [12] *Arquitectura de red 5G.* (s.f.). Programador Clic. Obtenido en: <https://programmerclick.com/article/32011792896/>
- [13] Agencia Española Protección de Datos, aepd. (Mayo 2020). *Introducción A Las Tecnologías 5g Y Sus Riesgos Para La Privacidad.* Nota-tecnica-privacidad-5g. pp. 5-13. <https://www.aepd.es/sites/default/files/2020-06/nota-tecnica-privacidad-5g.pdf>
- [14] Plokiko. (22/06/2022). *Así avanza el 5G en España: más cobertura, más velocidad, más frecuencias y más preparados para el 5G real.* Obtenido en: <https://www.xatakamovil.com/comparativa-de-tarifas/asi-avanza-5g-espana-cobertura-velocidad-frecuencias-preparados-para-5g-real>
- [15] Llorach, J. (23/06/2024). *Qué bandas ha de tener un móvil 5G para funcionar con las redes móviles de operadoras en España.* Obtenido en: <https://bandaancha.eu/articulos/que-bandas-soportar-tu-movil-5g-ser-9968>
- [16] Valero, C. (21/03/2024). *Bandas de frecuencia en España: cuáles son y cómo se reparten.* Obtenido en: <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/>
- [17] Comité Científico Asesor de Radiofrecuencias y Salud. (13/02/2020). *5G y Salud.* Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones. pp. 9-13. <https://ccars.org.es/publicaciones/documentos-elaborados-por-el-ccars/229-informe-del-ccars-sobre-5g-y-salud>
- [18] BOE-A-2001-18256. Real Decreto 1066/2001, (29/09/2021). *Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.* Ministerio de la Presidencia. Capítulo III; Anexo II. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-18256>
- [19] Montes, A. (17/09/2020). *Tecnología 5G: cómo reducir la exposición según los expertos.* CuerpoMente. Obtenido en: https://www.cuerpomente.com/ecologia/como-reducir-exposicion-tecnologia-5g_5243
- [20] *Sistemas Radiantes – VIMESA.* (2021). Obtenido en: https://www.vimesa.es/sistemas-radiantes/#:~:text=El%20Sistema%20Radiante%20es%20la,los%20oyentes%20de%20la%20Ozona_
- [21] Huidobro, Jose M. (2013). *Antenas de telecomunicaciones.* Acta, https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf

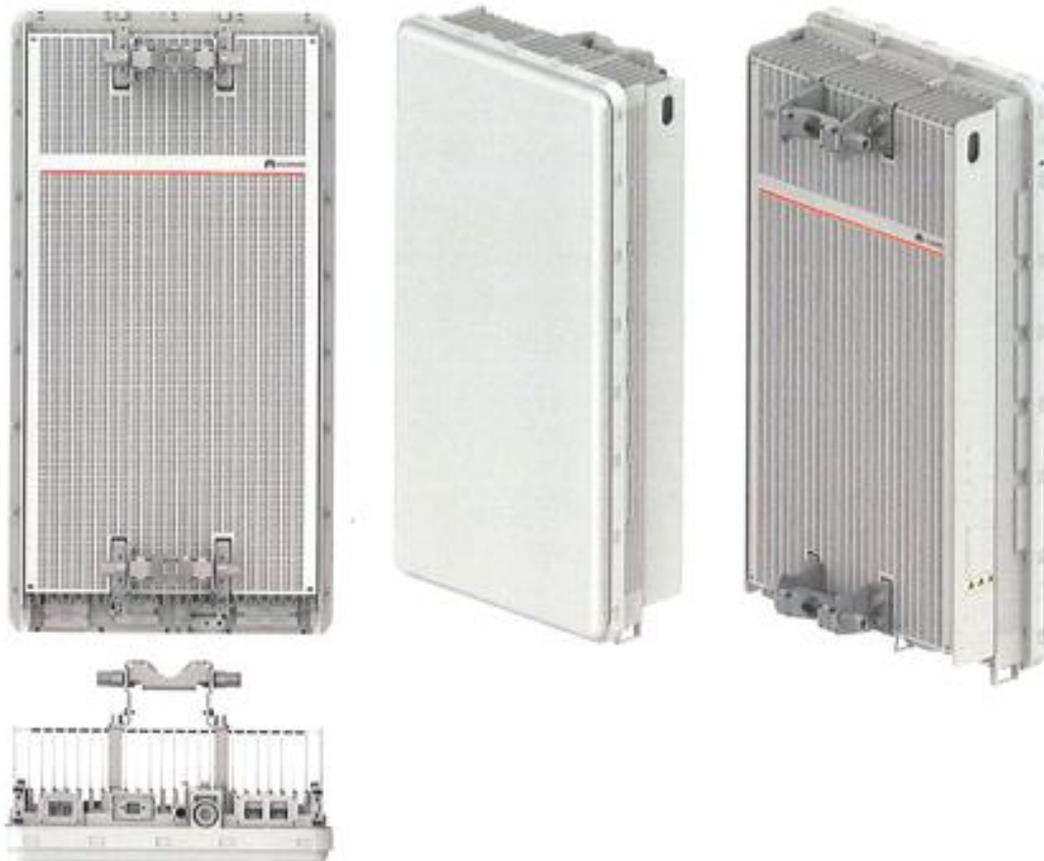
- [22] *Radiación electromagnética de alta frecuencia*. (s.f.). Radiansa. Obtenido en: <https://www.radiansa.com/es/radiacion-antenas-alta-frecuencia/radiacion-alta-frecuencia.htm>
- [23] Tan, T. (2022). *Differences Between AAU and RRU*. Huawei: forum Huawei. Obtenido en: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/differences-between-aau-and-rru/thread/667263895879958528-667213872962088960>
- [24] Gómez Hinestrosa, J. J. (s.f.). *Cómo orientar e instalar una antena parabólica a Astra, Hispasat o cualquier otro satélite*. Punto de Partida. Obtenido en: <https://www.puntodepartida.com/guias/parabolica/index.php>
- [25] Hersamu. (Mayo 2015). *Antenas paneles, partes y calcular Tilts*. Telnet. Obtenido en: <http://telnet360.blogspot.com/2015/05/antenas-paneles-partes-y-calcular-tilts.html>
- [26] Beijing Guoguang Xingda Technology Co., Ltd. (2017). *5g Indoor Blade Power Supply Eps100d-n01d1 Indoor Blade Ac For Rectifier C6030g1 Monitoring Module Sum11c*. Alibaba. Obtenido en: <https://ggxd.en.alibaba.com>
- [27] Porras Blanco, M. (2017). *KPI's ¿Qué son, para qué sirven y por qué y cómo utilizarlos?* *Logicalis, Architects of Change*. Obtenido en: <https://blog.es.logicalis.com/analytics/kpis-qu%C3%A9-son-para-qu%C3%A9-sirven-y-por-qu%C3%A9-y-c%C3%B3mo-utilizarlos>
- [28] ¿Qué es un KPI? Cómo definir los KPIs básicos para tu negocio. Tecon. Obtenido en: <https://www.tecon.es/que-es-un-kpi-como-definir-los-kpis-basicos-para-tu-negocio/>
- [29] *Estructuras metálicas*. (2024). Iestel. Obtenido en: <http://iestel.co/productos/estructuras/mastiles/>
- [30] Moreno, Miguel Á. (2022). *Por primera vez, un conductor de Tesla se enfrenta cargos penales por un accidente mortal en el que Autopilot estaría involucrado*. Business Insider. Obtenido en: <https://www.businessinsider.es/autopilot-tesla-involucrado-juicio-accidente-mortal-997973>
- [31] Peña, X. y Scalona, Pau. (2022). *Más cerca de lo que crees, uso de autos autónomos en la cotidianidad*. Conecta. Obtenido en: <https://conecta.tec.mx/es/noticias/toluca/educacion/mas-cerca-de-lo-que-crees-usos-de-autos-autonomos-en-la-cotidianidad>
- [32] Redacción Médica, (2017). *Realizan una cirugía ro-bó-ti-ca remota asistida por 5G a 136 km*. Hospital Central de Tianjin. Obtenido en: <https://www.redaccionmedica.com/secciones/tecnologia/realizan-una-cirugia-ro-bo-ti-ca-remota-asistida-por-5g-a-136-km-6509>

- [33] Vodafone (2021). *Vodafone concluye los casos de uso 5G desplegados en la estación de Adif de Málaga* María Zambrano. Málaga. Obtenido en: https://www.saladeprensa.vodafone.es/c/notas-prensa/np_Vodafone_adif_5G/
- [34] Dangi, R.; Lalwani, P.; Choudhary G. I., * and Giovanni Pau. Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors* 2022, 22(1), 26; <https://doi.org/10.3390/s22010026>. Obtenido en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/26/>
- [35] Tan, T. (2022). *AAU5639 Technical Specifications*. Huawei: forum Huawei. Referencia en: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/em-aau-em-em-5639-em-technical-specifications/thread/667266977657405440-667213872962088960>
- [36] Bienvenido a XIRIO ONLINE. Obtenido en: <https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx>

ANEXOS

ANEXO I

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE ANTENA 5G AAU5639w



Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	730 x 395 x 160
Antenna weight (kg)	38,5
Clamps weight (kg)	5.8 (2 units)
Operational temperature (°C)	-40°C to +55°C (without solar radiation)
Operating wind speed (km/h)	150 km/h
Rated wind velocity (km/h)	200 km/h
Wind Load (N)	Front: 425 N (at 150 km/h) Side: 135 N (at 150 km/h)

Figure 1-2 AAU dimensions

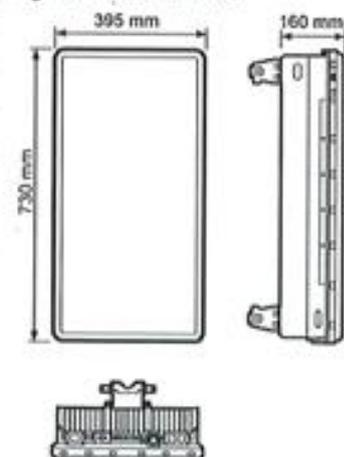


Figura 57. Características generales de antena 5G modelo AAU5639w [35].