

Doble simulación de exposición radioeléctrica y simulación de cobertura 5G mediante el software XIRIO online en Puerto del Rosario

Rubén J Fernández Santana

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Sistemas de Comunicación

Victor Martinez Illamola

Carlos Monzo

12/2020



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

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Doble simulación de exposición radioeléctrica y simulación de cobertura 5G mediante el software XIRIO online en Puerto del Rosario
Nombre del autor:	Rubén J Fernández Santana
Nombre del consultor/a:	Victor Martinez Illamola
Nombre del PRA:	Carlos Monzo
Fecha de entrega (mm/aaaa):	12/2020
Titulación::	Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Sistemas de Comunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	5G, XIRIO, 3GPP, Release 15, IMT-2020, UIT, exposición radioeléctrica, planificación, cobertura, interferencia, tráfico, paralelepípedos

Resumen del Trabajo

Actualmente nos encontramos ante un nuevo estándar de comunicaciones móviles, que supondrá un cambio sustancial con relación a las generaciones anteriores. Se utilizarán bandas de frecuencias hasta ahora no utilizadas para comunicaciones móviles donde aumentarán las velocidades de transmisión de datos y se incluirán nuevos servicios. El motivo de utilización de nuevas bandas de frecuencia es evitar la saturación de las bandas actuales, donde no hay ancho de banda suficiente para proporcionar las elevadas velocidades binarias requeridas.

El presente trabajo trata sobre el cálculo, representación y simulación de una red de telefonía móvil 5G tanto a nivel de exposición radioeléctrica [1] aplicando la norma ITU-T K.52 como a nivel de cobertura radioeléctrica usando la herramienta de simulación XIRIO Online [2] centrándose en la banda 3.6 – 3.8 GHz mediante antenas MIMO realizando un estudio de los modelos de propagación recogidos en el estándar 3GPP 38.901.

En este proyecto se pretende alcanzar los objetivos de cobertura, probabilidad de congestión y tráfico en cinco (5) estaciones existentes en la localidad de Puerto del Rosario mediante cálculos de cobertura, análisis de interferencia y carga de las celdas, proporcionado por la herramienta de simulación XIRIO Online.

Abstract

We are currently facing a new standard for mobile communications, which will mean a substantial change in relation to previous generations. Frequency bands not used up to now will be used for mobile communications where data transmission speeds will increase and new services will be included. The reason for using new frequency bands is to avoid saturation of the current bands, where there is not enough bandwidth to provide the required high bit rates.

This work deals with the calculation, representation and simulation of a 5G mobile telephone network both at the level of radioelectric exposure [1] applying the ITU-T K.52 standard and at the level of radioelectric coverage using the simulation tool XIRIO Online [2] focusing on the 3.6 - 3.8 GHz band using MIMO antennas, carrying out a study of the propagation models included in the 3GPP 38.901 standard.

This project aims to achieve the coverage, probability of congestion and traffic objectives in five (5) existing stations in the town of Puerto del Rosario through coverage calculations, interference analysis and cell load, provided by the simulation tool XIRIO Online.

Índice

1. Introducción.....	10
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	10
1.2 Objetivos del Trabajo.....	10
1.3 Enfoque y método seguido.....	11
1.4 Planificación del Trabajo.....	11
1.5 Breve resumen de productos obtenidos.....	12
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	12
2. Estado del Arte.....	13
2.1 Inicios.....	13
2.2 Evolución de las tecnologías.....	14
2.3 Comparativas herramientas de diseño.....	18
2.4 Repaso a otros trabajos.....	20
3. Radio Network.....	21
3.1 General.....	21
3.1.2 Cifras de rendimiento de radio.....	21
3.2 Espectro 5G.....	22
3.2.1 Avances generales de las frecuencias 5G.....	22
3.3 Tecnologías de acceso por radio 5G.....	24
3.3.1 Modelado de canales 5G.....	24
3.3.2 Principios de la tecnología de radio 5G.....	24
3.3.2.1 OFDM en 5G.....	25
3.3.3 Prefijo cíclico.....	27
3.3.4 Estimación y ecualización de canales.....	28
3.3.5 Modulación.....	29
3.3.6 Codificación.....	30
3.4 Enlace ascendente 5G: CP-OFDM y DFT-s-OFDM.....	30
3.5 Enlace descendente.....	30
3.5.1 MIMO avanzado.....	31
3.6 Nueva interfaz de radio (NR) de 3GPP.....	31
3.6.1 Elementos de la red 5G.....	32
3.6.1.1 gNB y ng-NB.....	32
3.6.1.2 AMF.....	32
3.6.1.3 UPF.....	33
3.6.2 Estructura de la trama.....	33
3.6.3.1 Enlace ascendente.....	34
3.6.3.2 Enlace descendente.....	34
3.6.4 Acceso múltiple.....	35
3.7 Escenarios de despliegue.....	35
3.7.1 No centralizado.....	35
3.7.2 Co-ubicado con E-UTRA.....	35
3.7.3 Implementación centralizada.....	36
3.7.4 RAN compartida.....	36
3.7.5 Despliegue heterogéneo.....	37
3.8 Escenarios de implementación autónomos y no autónomos.....	37
3.8.1 4G / 5G RAN y NGC independientes.....	38

3.8.2	5G NR no autónomo con 4G EPS	38
3.8.3	5G NR no autónomo con 5G NGC	39
3.8.4	E-UTRA 4G no autónomo con 5G NGC	39
4.	Modelos de propagación 5G	41
4.1	Escenarios	42
4.1.1	Macrocela Rural (RMa)	42
4.1.1.2	Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS	44
4.1.1.3	Probabilidad de LoS	44
4.1.2	Macrocela Urbana (UMa)	45
4.1.2.1	Pérdida en el trayecto de propagación para LoS	46
4.1.2.2	Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS	47
4.1.2.3	Probabilidad LoS	47
4.1.3	Microcela urbana (UMi – Street Canyon)	48
4.1.3.1	Pérdida en el trayecto de propagación para LoS	48
4.1.3.2	Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS	49
4.1.3.3	Probabilidad LoS	49
5.	Planificación de red 5G	50
5.1	Conceptos básicos de cálculo de presupuesto de enlace (Link Budget)	50
5.2	Cálculo de Cobertura 5G gNodeB	54
5.2.1	Cálculo Presupuesto UpLink y DownLink	54
5.2.2	Cálculo Cobertura	56
6.	Planificación Radioeléctrica	58
6.4	Dimensionamiento y planificación	71
6.4.1	Dimensionamiento	72
6.4.2	Resectorización	75
6.5	Resultados	76
6.5.1	Nivel de señal SS-RSPR	76
6.5.2	Mejor Servidor	78
6.5.3	Solapamiento	79
7.	Emisiones Radioeléctricas	80
7.1	Tipos de emisiones radioeléctricas (ER)	80
7.2	Efectos sobre la salud	81
7.3	Límites de exposición	82
7.4	Normativa vigente	82
7.4.1	Real decreto 1066/2001	83
7.4.2	Orden CTE/23/2002	84
7.5	Volúmenes de protección	87
7.5.1	Expresiones utilizadas para el cálculo	87
7.5.2	Supuestos tenidos en cuenta para el cálculo	89
7.5.3	Consideración de los niveles preexistentes	90
7.6.4	Resultados	91
7.7	Planos de planta y alzado, uno para cada sector	96
8.	Conclusiones vs Abstract	101
9.	Glosario	103
10.	Bibliografía	105
11.	Anexos	108

Lista de figuras

- Figura 1: Evolución de la Planificación en el tiempo
- Figura 2: Evolución de las tecnologías
- Figura 3: bandas definidas en 3GPP Release 15
- Figura 4: diferencias entre anchos de banda
- Figura 5: principal prefijo de OFDM
- Figura 6: interpretación en frecuencia de una señal OFDM
- Figura 7: prefijo ciclico (CP) evitando ISI
- Figura 8: Formación de bloque de recursos LTE
- Figura 9: Mapeo de señales de referencia específicas de celda de enlace descendente en LTE
- Figura 10: MIMO de dos puertos en LTE
- Figura 11: configuración de puerto para 4 antenas
- Figura 12: La constelación I / Q de QPSK (4QAM) y un conjunto de otras variantes de QAM
- Figura 13: Arquitectura de red 5G
- Figura 14: escenario de despliegue no centralizado
- Figura 15: escenario de despliegue co-ubicado con E-UTRA
- Figura 16: escenario de despliegue centralizado
- Figura 17: escenario de despliegue compartido
- Figura 18: Escenario de implementación independiente para 5G y 4G
- Figura 19: 5G NR y 4G no independientes.
- Figura 20: Opción 7 de implementación de 5G no independiente, denominada Opción 7
- Figura 21: El escenario no autónomo que representa la Opción 4 y 4a
- Figura 22: definición de distancias
- Figura 23: definición de distancias [TR 38.901]
- Figura 24: propagación de dos rayos en un entorno urbano
- Figura 25: probabilidad tipo 1 y tipo 2: a) escenario UMA; b) escenario UMi
- Figura 26: principio de propagación de radio para entornos NLoS: a) escenario UMA; b) escenario UMi
- Figura 27: Distancias para escenarios: outdoor (izquierda) y outdoor-indoor (derecha)
- Figura 28: cálculo basado en el estándar
- Figura 29: Ancho de banda en función de RB
- Figura 30: superficie a cubrir
- Figura 31: cálculo de tilt
- Figura 32: diagrama de radiación banda 3500
- Figura 33: Ventana principal de Xirio Online
- Figura 34: Modelo digital del terreno (MDT)
- Figura 35: Modelo de superficie (MDE)
- Figura 36: Situación nodos existentes de VDF
- Figura 37: localización e información nodos Vodafone [42]
- Figura 38: Crear nuevo estudio
- Figura 39: Propiedades del estudio de Cobertura
- Figura 40: Coordenadas
- Figura 41: Sectorización
- Figura 42: Propiedades Antena
- Figura 43: Parámetros de radio
- Figura 44: Parámetros 5G
- Figura 45: Planificador
- Figura 46: Configuración terminal
- Figura 47: Propiedades del método de calculo
- Figura 48: Cartografía
- Figura 49: Definición del área de cobertura
- Figura 50: Rango de colores establecido
- Figura 51: Sectores definidos
- Figura 52: Calculo de estudio individual
- Figura 53: Coberturas individuales_1

Figura 54: Coberturas individuales_2
Figura 55: Estructura hexagonal celular
Figura 54: Creación Cobertura Multitransmisor
Figura 55: Nombre y coberturas
Figura 56: Selección de BTS
Figura 57: Capacidad y Cálculo de señal
Figura 58: Área y cartografía
Figura 59: Parámetros de interferencia
Figura 60: Rango de colores
Figura 61. Calculo de estudio
Figura 62. Tareas
Figura 63: Simulación finalizada
Figura 64: Señal SS-RSRP
Figura 65: Mejor Servidor
Figura 66: Solapamiento
Figura 67: Cálculos permitidos
Figura 68: ubicación nodo Puerto Lajas
Figura 69: perfil orográfico Puerto Lajas
Figura 70: ubicación nodo Majada Marcial
Figura 71: perfil orográfico Majada Marcial
Figura 72: ubicación nodo Risco Prieto
Figura 73: perfil orográfico Risco Prieto
Figura 74: ubicación nodo Playa Blanca
Figura 75: perfil orográfico Playa Blanca
Figura 76: resectorización
Figura 77: resectorización XIRIO
Figura 78: nivel de señal SS-RSPR Puerto Lajas
Figura 79: nivel de señal SS-RSPR Majada Marcial
Figura 80: nivel de señal SS-RSPR Risco Prieto
Figura 81: nivel de señal SS-RSPR Playa Blanca
Figura 82: nivel de señal SS-RSPR zona centro
Figura 83: Relación radio y SS-RSPR
Figura 84: Mejor servidor
Figura 85: Solapamiento
Figura 86: Ionizantes, no-ionizantes y bandas de frecuencia
Figura 87: Tasa de absorción específica SAR
Figura 88: disposición geométrica
Figura 89: representación de volúmenes
Figura 90: dimensiones sistema de antenas
Figura 91: situación operadores

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Cada día las tecnologías móviles están más presentes en nuestras vidas, hasta el punto de que sin ellas no sabemos concebir el día a día. La sociedad se ha ido digitalizando a pasos agigantados a medida que han pasado los años, y ciertos sectores como el del automóvil, la salud etc...demandan una gran cantidad de recursos que hasta hace unos años eran impensables con la última red desplegada 4G/LTE [3].

Para satisfacer tal demanda, nace la red móvil de quinta generación llamada 5G NR (New Radio), denominado "standalone" de la mano de la 3GPP, quien ha sido la encargada de definir el estándar de las redes 5G con el fin y la idea de ser un sistema independiente que no necesitará apoyarse en los sistemas de redes existentes. A pesar de esto, dicha tecnología lleva desde comienzo de año desplegándose en nuestro país bajo el estándar "non-standalone", versión no independiente integrada en la estructurada red de antenas 4G/LTE existente.

Esta nueva tecnología está pensada para ofrecernos velocidades de conexión 10 veces más veloces que las actuales redes de FTTH consiguiendo reducir el tiempo de espera y aumentar el número de dispositivos conectados con el beneficio de una latencia mínima, obteniendo una conexión de calidad. También será clave la capacidad de conectar nuevos elementos, ubicaciones y servicios al mismo tiempo. El 5G será la llave de las ciudades inteligentes, domótica, automoción, transporte, medicina...y todo lo que uno pueda pensar. En definitiva, multitud de dispositivos conectados que tendrán una mayor autonomía con la misma capacidad y con una cobertura casi del 100%. Cabe destacar que el 5G conseguirá reducir el consumo energético de los dispositivos en un 90% [4].

Por todo esto, en el presente trabajo se estudiará y realizará una planificación de cobertura radioeléctrica de la red móvil 5G para adquirir los conocimientos necesarios ante los nuevos y futuros despliegues de la red 5G para los distintos operadores.

1.2 Objetivos del Trabajo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Master es el cálculo y representación de los paralelepípedos de referencia para las estaciones base objeto de estudio y simulación de una red de telefonía móvil de quinta generación tanto a nivel de exposición radioeléctrica como de cobertura en la ciudad de Puerto del Rosario para el operador Vodafone ya que dicho operador posee una red de comunicaciones bastante pobre en comparación con el resto de operadores y con la finalidad de desarrollar las habilidades, conocimientos y competencias necesarias que esta nueva tecnología ofrece.

A continuación se definen los principales objetivos del proyecto:

- Se estudiarán los requisitos dictados por la UIT y se revisarán las declaraciones de estandarización del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP).
- Se describirá el funcionamiento y la arquitectura de las redes 5G.
- Se estudiará, calculará y simulará los volúmenes radioeléctricos de cada uno de los emplazamientos afectados incluyendo los elementos necesarios de infraestructura específicos de la tecnología 5G tales como antenas, RRUs etc.
- Se realizarán los cálculos de cobertura y capacidad con objeto de optimizar el despliegue de las estaciones base para cumplir los objetivos de calidad, además de analizar los factores de diseño de radio que afectan a la cobertura de la red 5G haciendo uso de la información geográfica.
- Se hará un estudio profundo de la herramienta de simulación de cobertura radioeléctrica, XIRIO Online de Óptica.

1.3 Enfoque y método seguido

El proyecto estará dividido en tres partes. Comenzando por estudiar y profundizar en la tecnología 5G, empleando y accediendo a la documentación que la ITU y el 3GPP han elaborado y presentan en sus normativas o especificaciones.

Seguidamente se abordara el análisis de cobertura mediante la herramienta XIRIO online donde se explicarán los diferentes modelos de propagación radioeléctrica, luego abordaremos algunos aspectos generales de las herramientas de planificación, además de detallar el software particular usado para llevar a cabo la planificación radioeléctrica del proyecto y finalmente se realiza un estudio de cobertura multitransmisor donde analizaremos cobertura, interferencias y capacidad.

Y para concluir estudiaremos y definiremos las características radioeléctricas de la estación en función de los resultados obtenidos en la simulación de cobertura para concluir calculando y representando los volúmenes de protección.

1.4 Planificación del Trabajo

NOMBRE ACTIVIDAD	FECHA DE INICIO	DURACIÓN DÍAS	FECHA FIN
PAC 1	17-sep	11	28-sep
PAC 2	29-sep	13	12-oct
PAC 3	13-oct	54	06-dic
PAC 4	07-dic	24	31-dic
PAC 5	01-ene	17	18-ene

Tabla 1: Planificación del TFM

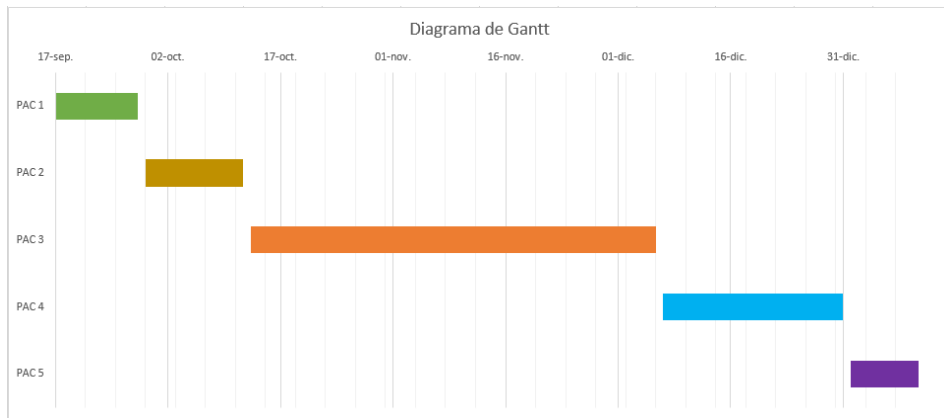


Figura 1: Evolución de la Planificación en el tiempo

	NOMBRE	DURACIÓN	INICIO	FIN
Hito 0	Contacto con el tutor y confirmación del tema del proyecto	0	17/09/2020	17/09/2020
	Realización del Plan del proyecto y planificación	3	17/09/2020	19/09/2020
	Búsqueda general de información	9	20/09/2020	28/09/2020
Hito 1	Entrega PEC 1	0	28/09/2020	28/09/2020
	Corrección PEC 1	1	29/09/2020	29/09/2020
	Explicación del Estado del Arte	2	30/09/2020	01/10/2020
	Estudio fundamentos redes móviles 5G	4	02/10/2020	05/10/2020
	Profundizar en arquitectura 5G, aspectos generales	3	06/10/2020	08/10/2020
	Explicación estandarización y espectro 5G	3	09/10/2020	11/10/2020
Hito 2	Entrega PEC 2	0	12/10/2020	12/10/2020
	Corrección PEC 2	2	13/10/2020	14/10/2020
	Investigación y análisis de la herramienta XIRIO online	4	15/10/2020	18/10/2020
	Inicio de simulación	3	19/10/2020	21/10/2020
	Continuación con la redacción del trabajo	19	22/10/2020	09/11/2020
	Estudio normativa de límites de exposición	4	10/11/2020	13/11/2020
	Cálculo y representación volúmenes radioeléctricos	3	14/11/2020	16/11/2020
	Continuación con la redacción del trabajo	19	17/11/2020	05/12/2020
Hito 3	Entrega PEC 3	0	06/12/2020	06/12/2020
	Corrección PEC 3	8	07/12/2020	14/12/2020
	Redacción de conclusiones	16	15/12/2020	30/12/2020
Hito 4	Entrega PEC 4 - Memoria final	0	31/12/2020	31/12/2020
Hito 5	Preparación defensa	17	01/01/2021	17/01/2021
	PEC5 - Tribunal	0	18/01/2021	18/01/2021

Tabla 2: Diagrama de Gantt

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

Los distintos productos obtenidos son:

1. Conocimiento de la última revisión 5G
2. Modelo de propagación idóneo para el municipio de Puerto del Rosario.
3. Cálculo teórico y simulación de cobertura radioeléctrica en el municipio de Puerto del Rosario.
4. Cálculo y representación de los volúmenes de protección en los emplazamientos existentes en el municipio de Puerto del Rosario.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

El capítulo 3 tiene como objetivo dar a conocer el funcionamiento y los posibles escenarios que aporta el 5G con la finalidad de integrarse en la infraestructura existente, además de coexistir con las tecnologías actuales. Se realiza un repaso de la arquitectura de red, mencionando los aspectos más interesantes de la tecnología 5G, tales como las características del interfaz de radio, control de acceso, asignación de recursos etc. También se comentan las nuevas ventajas en cuanto a funcionamiento de la modulación OFDM tanto para canales ascendentes como descendentes y se describe el sistema de antenas MIMO evolucionado para el 5G.

El capítulo 4 describe el modelo de propagación tanto para pérdidas de trayecto NLoS como para LoS, en función de varios tipos de escenarios que a posterior se emplearán en los capítulos 5 y 6.

En el capítulo 5 encontramos la Planificación 5G. Se incluyen conocimientos teóricos para entender más fácilmente cómo funciona la red 5G, facilitando así su posterior planificación.

En el capítulo 6 se detalla el funcionamiento de la herramienta de simulación XIRIO Online. Se realiza una introducción de los aspectos más importantes así como de los módulos imprescindibles para abordar cualquier planificación radioeléctrica. Seguidamente se analiza en profundidad la herramienta abordando el tema principal de este TFM, que consiste en el desarrollo de la planificación radioeléctrica del municipio de Puerto Rosario, con el fin de dotar a la población de cobertura 5G en base a los cálculos obtenidos en el capítulo anterior. Dicha planificación estará dividida en varios apartados, comenzando por integrar y analizar el 5G en los emplazamientos existentes, hasta expandir y optimizar la red para cubrir el área deseada realizando distintas simulaciones de cobertura.

En el capítulo 7 se explican los tipos de emisiones radioeléctricas existentes haciendo mención a la normativa vigente poniendo punto y final en los cálculos teóricos para posteriormente realizar la representación de los volúmenes de protección.

Y para concluir, en el capítulo de las conclusiones vs abstracts, hacemos un breve pero exhaustivo resumen del trabajo reflexionando sobre los resultados del mismo.

2. Estado del Arte

En este punto, se realizará una descripción global de la evolución de la telefonía móvil. Además de ello, se describirán algunos puntos necesarios sobre la tecnología 5G, haciendo un breve repaso de la historia.

2.1 Inicios

La telefonía móvil viene desarrollándose desde mediados del siglo XX, en primera instancia, se operaba con tecnología analógica, como por ejemplo TACS (Total Access Communication System), AMPS (Advanced Mobile Phone System), NMT (Nordic Mobile Telephone)... y posteriormente, se pasó a operar con tecnología digital (actualmente).

Esta tecnología está constituida por dos grandes partes a destacar, una es la red de telefonía móvil (red de comunicaciones) y otros, los terminales, que son los que permiten el acceso a dicha red.

En Junio de 1946, aparece el primer servicio telefónico móvil, concretamente en San Francisco, Missouri, de la mano de la compañía AT&T. Este sistema era analógico y operaba en la banda de 150 MHz, con separaciones de 60 KHz entre canales, hasta seis canales.

Era un sistema bastante simple, constaba de una sola antena, con un amplio radio de cobertura, pensado para comunicaciones móviles del ejército. De este modo, con un radio de cobertura de unos 80 Km aprox., se abastecería a una amplia zona de comunicación móvil interconectando los usuarios móviles (generalmente vehículos militares) con las líneas de telefonía fija, haciendo de este modo posible las comunicaciones con la base.

Posteriormente, en los años 60 y 70, la misma compañía (AT&T) comenzaba a diseñar los primeros sistemas de telefonía celular. Dicho nombre proviene de la base de esta nueva tecnología, y es que la distribución de la cobertura se realiza mediante un radio de cobertura en disposición de 'celdas', es decir, el radio de cobertura de la línea está compuesto por varias celdas, y solo si el dispositivo se encuentra dentro del radio de alcance de la misma, se verá provisto de ella. No siempre se ha trabajado con celdas, en primera instancia se usaban radioteléfonos, que transmitían hacia una antena central en cada ciudad con 25 canales disponibles. El gran inconveniente que tenía este sistema, era que exigían transmisores muy potentes, tanto como para tener un radio de alcance de entre 70 y 80 Km y como era absolutamente inviable por lo caro del sistema y la escasez de frecuencias, se desarrolló el sistema de celdas que se comento arriba.

La célula al tener un tamaño mucho más reducido, requiere transmisores mucho menos potentes que los radioteléfonos y además, proporciona un uso extensivo de frecuencias en todas las ciudades gracias a la reutilización de las mismas.

El funcionamiento de las nuevas zonas de cobertura, consiste, como ya se ha comentado, en la repartición de la zona a tratar en las celdas necesarias para cubrir todo el territorio. Las celdas serán hexagonales, para cubrir el máximo territorio posible, aunque en la práctica es evidente que no tienen un rango de acción hexagonal.

Cada célula constaba de una estación base transmisora, lo que aporta tener múltiples canales para el uso de decenas de terminales de manera simultánea y, cuando un usuario abandona la célula en la

que se encuentra, deja la frecuencia que estaba utilizando para el uso de otro terminal y adopta la frecuencia libre que exista en la nueva célula en la que se encuentre localizado.

Es importante mencionar, que esta práctica de disposición celular, donde cada una de las celdas tiene una estación base, quedará en desuso en pos de una mejora de la misma.

Para el LTE, entre otros sistemas anteriores, se utilizarán celdas trisectorizadas. De este modo existirá una sola estación base por cada tres celdas, situada está en el punto límite común de las tres, con esto se evitará una posible congestión del espectro ya que se podrán reutilizar las frecuencias de trabajo entre estaciones que se encuentren a suficiente distancia, es decir, donde la interferencia entre ellas sea mínima.

La ventaja de este recurso es que, al disminuir la distancia de transmisión, los terminales pueden transmitir con poca energía y por tanto, se reducen las baterías que estaban ligadas a los grandes tamaños de celulares y a su elevado peso.

2.2 Evolución de las tecnologías

La primera tecnología que revolucionó las comunicaciones móviles, fue el 2G, que aun hoy en día se utiliza como tecnología de soporte 3G. El 2G, ha tenido antecesores que sentaron sus bases. Es el caso de la tecnología '0G'.

La tecnología 0G, fue la primera en sentar precedentes en las comunicaciones móviles, se correspondía con los radio teléfonos, cuyas tecnologías eran: PPT, MTS, IMTS y AMTS y trabajaban conectados a la red de telefonía fija, con sus propios números.

Con la llegada del sistema de celdas, nació la tecnología '1G', tecnología de primera generación donde los primeros terminales llegaron en los años 80 tras la iniciativa de AT&T en la implantación del nuevo concepto de tecnología celular.

Algunos de los estándares más conocidos de esta nueva generación son [5] [6]:

- NMT (Nordic Mobile Telephone (usado principalmente en los países Nórdicos y más tarde en Holanda, Europa del Este, Rusia y España.
- NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) en Japón, TACS utilizado en Reino Unido (Total Access Communications System) o, el AMPS (Advanced Mobile Phone System, o como se traduciría al idioma, Sistema Telefónico Móvil Avanzado) en América.

Tomando como ejemplo el sistema de telefonía móvil 2G de la mano de AMPS cuyo desarrollo se realizó en los laboratorios Bell en el 82 y se implantó en Inglaterra y Japón bajo las nomenclaturas de TACS y MCS-L1, que posteriormente quedaron obsoletas con la llegada del GSM (Global System for Mobile Communications), siguiendo el funcionamiento de celdas. El problema del sistema se debe al cambio de celda mediante la comunicación móvil, problema que se solucionó mediante el 'handoff' (análisis de la potencia de la señal emitida y la recibida por las BS, para conectarse al canal disponible en la celda adyacente a la que se ha pasado), el cual podría llegar a cortar la comunicación hasta unos 300 ms para reanudarse inmediatamente después.

Este sistema utiliza unos 832 canales dobles, que se dividen en 832 canales de subida y 832 canales de bajada con un ancho de banda disponible (individualmente) de unos 30Khz, número inmensamente inferior a los 200KHz de sistemas como el GSM. Además, opera en el rango de frecuencias de 824 a 849 MHz para la transmisión y en el rango de los 869 a los 894 MHz para la recepción, ambos con un ancho de banda de unos 25MHz. Todos los canales no se utilizan para la comunicación de usuarios, hay canales que se destinan a control, a asignación de canales o incluso para alertar de llamadas entrantes, sin embargo, este sistema cayó en desuso, aunque vigente hasta el 2008, con la llegada del GSM o D-AMPS (Digital – Advanced Mobile Phone System), este último es el mismo sistema pero en digital.

Es importante haber comentado acerca de este sistema, ya que fue imprescindible para el desarrollo de las comunicaciones móviles, por su éxito y por las grandes aportaciones novedosas en cuanto a ideas se refería. Hasta el 2008 siguió vigente como sistema por sí solo, incluso, en la actualidad se utiliza como tecnología de respaldo, con algunos inconvenientes y ventajas.

Su ventaja más significativa es que cubre más territorios que las vigentes tecnologías digitales TDMA (Time Division Multiple Access), GSM y CDMA, pero su inconveniente es que no es compatible con sistemas de SMS (Short Message System) o el tráfico de datos, como consecuencia de ser estrictamente analógica.

Tras la tecnología 1G, llega la tecnología 2G (segunda generación) y con ella, la migración de los sistemas analógicos que había dominado el panorama actual hasta el momento, al dominio digital.

Comenzó en 1990 y surgió por la necesidad de tener una mejor gestión de las llamadas en los mismos espectros de radiofrecuencia, la solución a esto, fue la implantación de nuevos protocolos de telefonía digital que además de permitir varios enlaces simultáneos en el mismo ancho de banda, incorporaron novedosos servicios, como el de llamada en espera, servicio de mensajería corta, tráfico de datos... etc.

Algunos de los protocolos más importantes de tecnología 2G son GSM, TDMA (conocido también como TIA/EIA136 o ANSI-136) sistema regulado por la Telecommunications Industry Association o TIA, IS-95/cdmaONE, conocido como CDMA (Code Division Multiple Access), D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System), entre otros. Algunos de los pioneros en la tecnología fueron el D-AMPS, que residía únicamente en el traslado a digital del AMPS y que también se conoce como IS – 54 (Interim Standard 95) o USDC (United States Digital Cellular).

Entre otras mejoras de esta tecnología destaca, la utilización de modulación D-QPSK, que permite una tasa de transmisión de 48.6 Kbits/s con canales de 30KHz, para dar una eficiencia de ancho de banda de 1.62 bit/s (20% mejor que GSM), la única desventaja es que con esta modulación lineal la ineficiencia en potencia se traduce en dispositivos más pesados, mas recargas de baterías y peor calidad de voz.

Es importante que mencionemos el Acceso Múltiple por división de tiempo (TDMA), técnica que permite la transmisión de señales digitales y que consiste en ocupar un canal de transmisión a partir de distintas fuentes, consiguiendo un mayor aprovechamiento del medio en el que se transmite. [7]

En aquellos años, en Europa un grupo de países creó el “grupo móvil especial” (groupe spécial mobile) [8], una tecnología celular puramente digital, dejando atrás el método analógico que se venía utilizando en antiguas tecnologías. Se desarrolló un sistema de banda estrecha trabajando bajo

TDMA combinada con FDMA. Se realizaron las primeras pruebas de campo y posteriormente, se cubrieron en primera instancia a las principales ciudades europeas en 1991...posteriormente se añadió a la red la posibilidad de envío de fax, datos y video y rápidamente el sistema se empezó a extender a nivel mundial. Esta nueva tecnología paso de ser un sistema únicamente europeo a una tecnología a nivel global, de ahí el sobrenombre por el que se rige en la actualidad "Global System for Mobile communications" (GSM).

Una de las novedades más significativas que aportaba era la capacidad de soportar la transmisión de datos y voz a velocidades de 9.6 kbit/s. Lo que permitió la aparición del "mensaje corto de texto" (SMS).

La tecnología 2G móvil coexiste en la actualidad con nuevos sistemas de comunicación móvil, como los sistemas de tercera generación (3G). Sin embargo este salto tecnológico no fue tan abrupto, antes de que se produjese esta migración, se pasó por los sistemas 2.5G y 2.75G.

En el paso de la tecnología 2G a la 3G, surgió un nuevo sistema CDMA (acceso múltiple por división de código) 1xRTT (Tecnología de radio de transmisión). Este sistema era el núcleo estándar de interfaz inalámbrica CDMA2000. Incluía mejoras, como la duplicación de la capacidad de voz sobre el sistema anterior (IS-95) o una mejora significativa en la transmisión de datos llegando a una velocidad pico de 144 Kbits/s. Además algunas diferencias que incluye son, la permisibilidad de una modulación coherente y 64 canales entre otras mejoras.

Antes de esta nueva tecnología, se desarrollaron otras como GPRS (servicio general de paquetes vía radio) con velocidades de transmisión de 56 a 144 Kbps y EDGE (tasas de Datos Mejoradas para la Evolución del GSM) alcanzando tasas de hasta 384 Kbps, que aportaban una transferencia de datos muy superior a la que proporcionaba el sistema original GSM. Fue barato implantarlas ya que tan solo había que añadir un módulo EDGE o GPRS a la arquitectura de la red, sin tener que cambiar la infraestructura GSM. Tras los grandes avances que se consiguieron con la implantación de esta tecnología intermedia, surgieron nuevos estándares en los sistemas de comunicación de 3G. En la actualidad los más utilizados son el UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) y cdma2000 1x-EV-DO tanto Rev A, como Rev 0 (1x-Evolution-Data Optimized). CDMA2000 1x-EV-DO (IS-856) es una evolución del anterior sistema 1x, donde su mejora más significativa se aprecia en la alta velocidad de transferencia de datos (HDR [alta velocidad de datos]). En la Rev. A, las velocidades de datos en bajada (enlace de reenvío), alcanzan hasta 3.1 Mbps y en subida (enlace inverso) hasta 1.8 Mbps. En la Rev. 0, las velocidades de bajada llegan hasta 2.5 Mbps y de subida de hasta 154 Kbps [9].

Por otro lado, el sistema que tuvo una amplia aceptación tras la implantación del GSM, fue el UMTS. (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles). Evolución del estándar GSM, y aportando mejoras considerables respecto a éste, como mejora de la calidad de voz, prácticamente similar a las de telefonía fija, capacidades multimedia para el streaming de audio y video y, conexión de datos de alta velocidad. Las tasas de transferencia de datos desde 144 Kbps hasta 7.2 Mbps. Una de las principales ventajas de UMTS sobre 2G, es precisamente la capacidad de soportar mayores velocidades de transmisión de datos.

Al igual que pasa con la transición del 2G al 3G, entre el 3G y el 4G hay otro tipo de tecnologías subyacentes denominadas 3.5G o 3G+ y 3.75G cuyas mejoras mas significativas están en la capacidad máxima de transferencia de información donde se llegan alcanzar hasta los 14Mbps de tasas de bajada y la aparición de la tecnología HSDPA (Acceso de paquetes de enlace descendente

de alta velocidad) tecnología basada en conexiones minis para la primera y para el 3.75G destacamos la aparición de la tecnología HSUPA (Acceso a paquetes de enlace ascendente de alta velocidad) para terminar de completa al HSDPA y cuya combinación se denomina HSPA (Acceso a paquetes de alta velocidad) esta tecnología está pensada para que los usuarios puedan envían ficheros multimedia directamente a otros, imágenes/videos en tiempo real a la red o los juegos en tiempo real contra otro jugador.

A finales del 2004 el 3GPP se reunió para comenzar a abordar la evolución del 3G hacia una nueva generación, el 4G.

La tecnología 4G está basada completamente en el protocolo IP, una estructura más económica...que consta de una red de acceso denominada LTE o E-UTRAN (Red de Acceso a la Radio Terrestre) formando por eNodeBs y una nueva arquitectura de red troncal llamada EPC (Núcleo de paquetes evolucionado), la cual permite la movilidad entre múltiples y heterogéneos sistemas de acceso (2G/3G, LTE, WLAN, etc.) eliminando el uso de la conmutación de circuitos y funcionando únicamente con conmutación de paquete; se consiguieron tasas de datos de transferencia superiores a 100 Mbps (movilidad) llegando a 1 Gbps (reposo); mejoraron la calidad del servicio reduciendo el tiempo de latencia tanto en plano de control como de usuario.

Para el despliegue de esta red, se tuvo que liberalizar la banda de 800MHz. Desde sus inicios, el despliegue de esta tecnología ha sido optimizada con LTE Advanced o 4.5G donde se puede alcanzar velocidades en descarga de hasta 300 Mbps. [10]

Por último, la nueva generación, 5G, nombrada por la ITU como IMT-2020, nombre clave pues su implantación ha comenzado este año. Por primera vez, deja de utilizarse hardware específico de telefonía para dar paso a equipos de propósito general, haciendo uso de tecnologías de virtualización, contenedores y orquestación. Esto representa una ventaja a nivel de costes y flexibilidad de implementación, y por otro lado hace que la infraestructura sea interoperable y accesible por equipos en Internet.

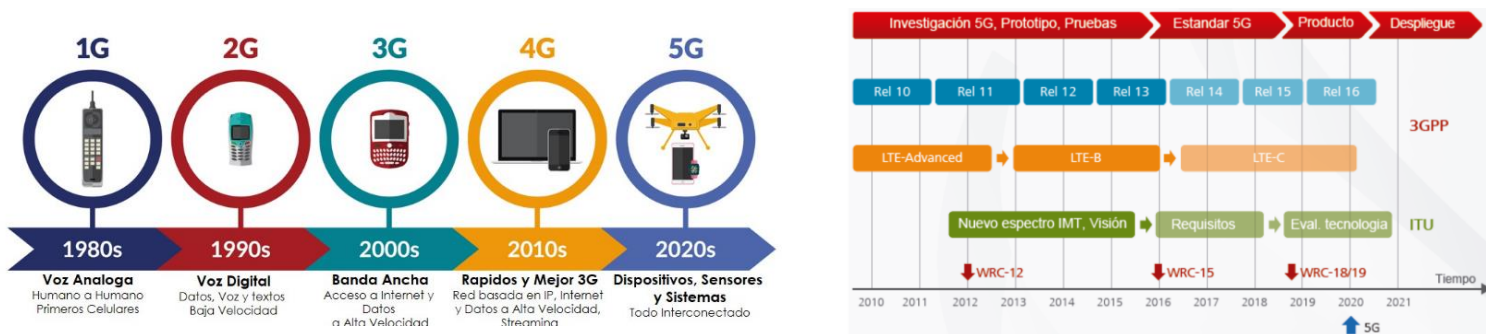


Figura 2: Evolución de las tecnologías [34]

La era del 5G, definida por la ITU-R ha definido tres (3) escenarios claves:

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB), centrado principalmente en los sistemas móviles 3G y 4G dado que la demanda por parte de los usuarios requiere de nuevos requisitos abarcando una gran gama de casos de uso con distintos elementos a superar, como son: amplia cobertura, alta velocidad de datos, alta densidad de usuarios y grado elevado de movilidad. Todos estos elementos requieren una mejora de la banda ancha móvil y que la UIT considere esta mejora como uno de los principales escenarios en 5G.

- Comunicaciones ultra-fiables y de baja latencia (URLLC), donde este escenario incluye las comunicaciones desde las humanas hasta las masivas de tipo máquina. Se requieren comunicaciones con alto grado de fiabilidad y una muy baja latencia, cuyos principales ejemplos de aplicación son la comunicación vehículo a vehículo con seguridad, control inalámbrico de equipos, cirugía médica remota, automatización de la distribución en una red inteligente.
- Comunicaciones masivas de tipo máquina (M-MTC) cuyo escenario se centra solo en las comunicaciones máquina a máquina. La característica principal es el elevado número de dispositivos conectados que transmiten volúmenes de datos pequeños. A pesar de estas bajas velocidades de datos el elevado número de elementos provocan una alta densidad de tráfico y como consecuencia del número total de dispositivos se requieren bajos costos, implementación remota de los dispositivos M-MTC y necesidad de una larga duración de baterías.

Y para concluir este apartado se definirán las mejoras que se conseguirán con 5G respecto a la generación de comunicaciones anterior (4G). Para ellos nos basaremos en la visión de la UIT-R [11].

- Tasa de datos de pico: Llegando a picos teóricos de 20 Gbit/s mejorando por 20 la tasa ofrecida por 4G.
- Tasa de datos experimentada por el usuario: Disfrutando de 100 Mbit/s frente a los 10 Mbit/s de la generación actual.
- Eficiencia espectral: Mejorada por 3.
- Movilidad: Aumenta considerablemente, un aspecto clave debido a la demanda existente.
- Latencia: Muy apreciada y muy necesaria; es uno de los aspectos principales de 5G. Disminuye en un factor de 10 llegando a 1 ms.
- Densidad: Debido al crecimiento exponencial de dispositivos se hace imprescindible aumentar la densidad de conexión.
- Eficiencia de la red: Comentada en los puntos anteriores como un aspecto muy importante. Mejora en 100 veces con respecto a 4G.
- Capacidad de tráfico por metro cuadrado: Mejora sustancial desde 0.1 Mbit/s/m² a 10 Mbit/s/m².

Cuando la tecnología 5G alcance un grado de madurez adecuado, se darán las condiciones necesarias para que la terna 5G-IoT-IA proporcione servicios novedosos y disruptivos [12].

2.3 Comparativas herramientas de diseño

Existen varias herramientas de planificación y optimización de radio que permite a los operadores de telefonía móvil realizar su diseño de red y estudiar el comportamiento de las mismas para conseguir optimizarlas de la mejor manera posible. A continuación nombraremos algunas de ellas:

➤ Atoll Radio Planning Software

Atoll incluye capacidades avanzadas de diseño de red para tecnologías de acceso de radio, donde se incluye 5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM y CDMA. Es compatible con los últimos avances tecnológicos, como MIMO masivo, formación de haces 3D y propagación mmWave para el diseño y despliegue de redes 5G. Las funciones de integración y personalización de Atoll

ayudan a los operadores a agilizar sin problemas los procesos de planificación y optimización. Lo más destacado de Atoll es:

- Permite modelado de RAN de varias RATs
- Diseño de red 5G
- Planificación y optimización basadas en predicciones y mediciones
- Modelado integrado de interiores y exteriores
- Capacidades de personalización integradas

Y entre sus características generales:

- Funciones GIS: gestión de datos cartográficos (modelos digitales de elevación, alturas, edificios 3D).
- Modelos de propagación: Biblioteca de modelos de propagación integrados.
- Gestión de usuarios y bases de datos: Estructura de base de datos flexible, soporte multiusuario, funciones de importación etc.
- Personalización: Permite integración de macros definidas por usuario tales como cálculos.
- Computación distribuida: Computación distribuida en estaciones de trabajo y servidores en red
- Reportes: Generador de informes estadísticos de tráfico, población. Informes basados en macros. Exportación de informes y gráficos.
- Módulo de medición: Importación, visualización y análisis de datos. Ajuste automático de modelo de propagación.

Como se ve, Atoll es una herramienta muy potente que aporta infinidad de recursos. Aparte de que es una herramienta que trabaja en local, es decir, es necesario descargarla e instalarla en el PC y aparte para poder trabajar con ella, también es necesario comprar una licencia.

➤ ATDI ICS Telecom

La herramienta de planificación ICS Telecom es un producto de la compañía francesa ATDI, ICS Telecom es una herramienta que permite planificar las redes de comunicaciones de radio y administrar el espectro de las frecuencias. ICS Telecom puede modelar cualquier red de radio, independientemente del tamaño, si son o no redes locales.

ICS Telecom permite evaluar a las tecnologías, dimensionar infraestructuras, planificación de red, optimización del espectro, entre otros. Con esta herramienta se pueden simular todas las tecnologías de radio actuales, tanto fijas como móviles, comprendidas en la gama de frecuencia de 10kHz a 450GHz, algunas de las tecnologías que incluye son: Difusión de TV y radio analógica y digital, Comunicaciones fijas, Comunicaciones móviles, Microondas, Celular/UMTS, Radar, Satélite, Telemetría, 2G, 3G, 4G hasta el 5G... Cuenta con multitud de modelos de propagación para poder diseñar y planificar la red lo más real posible. En función de la licencia adquirida se puede optar por diferentes tipos de cartografías partiendo desde baja, medio o alta resolución. Es necesaria tenerla instalada en el ordenador.

➤ XIRIO Online

El desarrollo de esta herramienta se abordará en los siguientes capítulos.

Solo comentar que la elección de XIRIO está basada principalmente en que es una herramienta online, lo cual no consume recursos del PC, solo es necesario tener una cuenta y una buena

conexión a internet. Es una herramienta de fácil manejo, interpretación de parámetros y muy rápida en cuanto al resultado de los cálculos. Aparte posee una amplia biblioteca online de ayuda para hacerte comprender mejor como se hace, que hace y cual es la finalidad de cada una de las ventanas que proporciona a la hora de planificar un proyecto.

Cierto es que desde unos años atrás hasta el día de hoy, la herramienta ha sufrido una fuerte demanda por parte de las operadoras del país, ya que al igual que las anteriores herramientas, posee multitud de modelos predictivos, cartografías de varias resoluciones, cálculos etc...

2.4 Repaso a otros trabajos

Quiero hacer mención a algunos trabajos relacionados con el 5G que me he encontrado en la red que tienen algún punto en común con este TFM.

- Planificación de sistemas de radio. en la banda 3,5 GHz para comunicación móviles 5G [44]

Este proyecto aborda la planificación sobre el 5G en base a la Recomendación UIT-R P.1411, definiendo un entorno de propagación a nivel de calle, es decir, el transmisor no está a nivel de cubierta y el receptor están a nivel de suelo y para ello según el modelo de propagación definido en la Recomendación se tienen que tener en cuenta las dimensiones de las calles, el tipo de escenario, es decir, se estudia una morfología en concreto, calles perpendiculares entre sí y formando ángulos de 90° para poder aplicar los cálculos de manera correcta.

- Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G (año 2016) [45]

Este Trabajo aborda fundamentalmente la evolución de los modelos de propagación desde el 4G hasta llegar al 5G para poder abordar una planificación lo más precisa posible teniendo en cuenta las atenuaciones del entorno ya que la elección de un correcto modelo es muy importante de cara a conseguir el objetivo. En el cuarto bloque de este Trabajo, se aborda la tecnología 5G y después de dar varios datos interesantes acerca de dicha tecnología explica los modelos de propagación que por aquel entonces estaban en vías de desarrollo y que actualmente han servido de base para los actuales, ya sea UIT-R P.1411, 3GPP 38.901.

- Caracterización del Canal Radio en la Banda de 3,5 GHz para sistemas 5G (año 2019) [46]

Trabajo enfocado en el estudio de medidas en campo con el fin de analizar los parámetros más importantes tanto del canal de banda ancha para el 5G como de los parámetros del canal MU-MIMO para conocer la eficiencia espectral y/o capacidad del sistema. Para ello se compara con modelos de propagación basados en el Trazado de rayos.

3. Radio Network

3.1 General

El 5G es el conjunto de frecuencias más versátil jamás visto en generaciones anteriores de comunicaciones móviles, también la planificación de la red de radio respectiva experimentará cambios importantes. La interfaz de radio del 5G cambia de imagen en comparación con los sistemas de comunicaciones móviles anteriores. La razón principal de tal cambio son las capacidades nuevas y completamente renovadas del acceso inalámbrico 5G que deben ser capaces de atender casos de uso que están mucho más allá de las generaciones anteriores.

Las capacidades incluyen velocidades de datos mucho más altas y valores de latencia mucho más bajos. Además, de seguir sirviendo a los clientes con una confiabilidad ultra alta y de admitir una mayor eficiencia energética y una densidad extrema de dispositivos, esto significa que la tecnología de radio debe actualizarse en comparación con las versiones anteriores, incluida el LTE-Advanced (LTE-A).

El desarrollo de la nueva interfaz de radio (NR) para el 5G se llevará a cabo a través de una mayor evolución de LTE, combinada con tecnologías de acceso por radio completamente nuevas. Esta interfaz de radio nativa y específica de 5G se conoce como NR y, junto con esta evolución, algunas de las soluciones clave incluyen la extensión de las frecuencias admitidas a bandas de frecuencia más altas, mucho más allá de la región de 6 GHz.

Habrà una integración más profunda de los subsistemas de acceso y backhaul. Además, 5G está considerando específicamente el soporte fluido de la comunicación de dispositivo a dispositivo y, por lo tanto, admite una gran cantidad de dispositivos de comunicación simultáneos, como vehículos, máquinas, sensores inteligentes, etc. Otro tema clave de la evolución de 5G es las características dinámicas de las comunicaciones, incluido el dúplex flexible y la asignación de espectro, dependiendo cada vez más de la transmisión de múltiples antenas. Cabe mencionar también la nueva y más clara separación de planos de usuario y control [13].

La arquitectura 5G optimiza los recursos y el área de cobertura ya que minimiza la carga de transmisión que no está directamente relacionada con los datos del usuario. Los datos de usuario incluyen señalización para sincronización, estimación de canal, adquisición de red y difusión de información de sistema y control [13].

El diseño simplificado es esencial para dar servicio a centros de uso densos que contienen una gran cantidad de nodos de red y condiciones de tráfico variables. Además, el diseño 5G para la transmisión optimiza cualquier implementación. Como los nodos de la red pueden entrar en un estado rápido y de baja energía con la carga, p. Ej. cuando no se produce ninguna transmisión de datos de usuario; Contribuye positivamente a la eficiencia energética. Un beneficio adicional del diseño de la red 5G es el impacto positivo en la alta velocidad de datos, ya que se puede minimizar la interferencia de otras transmisiones de datos del usuario.

3.1.2 Cifras de rendimiento de radio

En cuanto a la estructura de la trama, tanto el 5G NR como el 4G LTE tienen la misma duración de trama de radio (10 milisegundos), lo mismo sucede con la sub trama (1 milisegundo) o con la duración de slot (0.5 milisegundos), diferenciándose en la configuración de este último, siendo el primero configurable de forma dinámica y semi estática mientras que para el LTE la configuración está

predefinida. En la siguiente tabla se resumen otras declaraciones claves de las interfaces de radio 4G y 5G:

Características	4G LTE	5G NR
Codificación de canal para datos	Turbo	LDPC
Codificación de canal para control	TBCC	Polar
Esquema de modulación para enlace ascendente	Multiplexación por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA)	DFT-S-OFDM; OFDM (opcional)
Esquema de modulación para enlace descendente	OFDM	OFDM
Ancho de banda (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15,	5,..., 100 (sub-6GHz); 50,..., 400 (por encima de 6GHz)
Espaciado de subportadoras (kHz)	15 (unidifusión, difusión multimedia Servicio de multidifusión [MBMS]); 7.5 / 1.25 (portadora dedicada MBMS)	30, 60, 120; 240 (no para datos)
Max. agregación de portadores (CC)	32	16
Max. Puertos de antena MIMO	8 (SU-MIMO); 2 (MU-MIMO)	8 (SU-MIMO); 16 (MU-MIMO)
Transmisión / retransmisión HARQ	TB	TB, grupo de bloques de código

Tabla 3: comparación de las características de la interfaz de radio 4G y 5G [35]

3.2 Espectro 5G

3.2.1 Avances generales de las frecuencias 5G

La mejora elemental de 5G es la capacidad de manejar velocidades de datos mucho más rápidas y proporcionar una mayor capacidad para comunicar simultáneamente a consumidores y máquinas. Para hacer frente a estas demandas y requisitos, las redes 5G proporcionarán equipos de radio con soporte extendido de bandas y anchos de banda donde habrá nuevas bandas de frecuencia por debajo y por encima de la banda de 6 GHz definidas por la UIT-R.

Como normalmente hay más demanda que oferta para las frecuencias, puede ser necesario optimizar la utilización de las frecuencias. Una de las formas de utilizar las bandas de la manera más eficiente posible es el llamado enfoque de espacio en blanco. Se refiere a bandas compartidas que pueden ser utilizadas por diferentes partes interesadas según sea necesario. Además de los modos tradicionales para los modelos comerciales (operadores de redes móviles (MNO) que compran derechos para la utilización de frecuencias con licencia) y estas ideas novedosas para un rendimiento más óptimo a través de la capacidad compartida, también existen opciones potenciales para nuevos fragmentos de espectro, como la comunicación por satélite y la ubicación por radio. Algunos ejemplos de estos modos de uso compartido se ven a través del Acceso compartido con licencia (LSA) que se está planificando actualmente en Europa en la banda de 2,3 GHz, así como el Servicio de radio de banda ancha de los ciudadanos (CBRS) en los Estados Unidos que dependería de 3,5 GHz banda.

A medida que aumenta la necesidad de las bandas de frecuencia 5G a la par del mayor uso de los servicios 5G, en parte debido al gran aumento del tipo de comunicaciones M2M, las características de propagación de las ondas de radio son el cuello de botella. Por lo tanto, para las áreas de cobertura más grandes por celda de radio, las frecuencias deben ser bajas, mientras que las áreas de cobertura de mayor capacidad deben depender de las frecuencias más altas.

Se puede concluir que las frecuencias de radio más relevantes para el 5G van desde aproximadamente 1 hasta 30 GHz, pero no se descarta llegar hasta los 100GHz para las celdas técnicamente funcionales y de rango muy cercano.

3.2.2 Bandas 5G

Las bandas de frecuencia para LTE se definen en 3GPP TS 36.104, y las bandas 5G se pueden encontrar en 3GPP TS 38.104 (ver Tabla 3), Cabe destacar que el número de bandas LTE ha aumentado de manera constante junto con las nuevas versiones de especificaciones técnicas 3GPP.

La lista presentada se basa en la versión de especificación 15.2.0, con fecha de marzo de 2018.

CH	$f_{UL,low}$ MHz	$f_{UL,high}$ MHz	$f_{DL,low}$ MHz	$f_{DL,high}$ MHz	Mode
1	1920.0	1980.0	2110.0	2170.0	FDD
2	1850.0	1910.0	1930.0	1990.0	FDD
3	1710.0	1785.0	1805.0	1880.0	FDD
4	1710.0	1755.0	2110.0	2155.0	FDD
5	824.0	849.0	869.0	894.0	FDD
6	830.0	840.0	875.0	885.0	FDD
7	2500.0	2570.0	2620.0	2690.0	FDD
8	880.0	915.0	925.0	960.0	FDD
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	FDD
10	1710.0	1770.0	2110.0	2170.0	FDD
11	1427.9	1447.9	1475.9	1495.9	FDD
12	699.0	716.0	729.0	746.0	FDD
13	777.0	787.0	786.0	786.0	FDD
14	788.0	798.0	758.0	768.0	FDD
15	N/A	N/A	N/A	N/A	FDD
16	N/A	N/A	N/A	N/A	FDD
17	704.0	716.0	734.0	746.0	FDD
18	815.0	830.0	860.0	875.0	FDD
19	830.0	845.0	875.0	890.0	FDD
20	832.0	862.0	791.0	821.0	FDD
21	1447.9	1462.9	1495.9	1510.9	FDD
22	3410.0	3490.0	3510.0	3590.0	FDD
23	2000.0	2020.0	2180.0	2200.0	FDD
24	1626.5	1660.5	1525.0	1559.0	FDD
25	1850.0	1915.0	1930.0	1995.0	FDD
26	814.0	849.0	859.0	894.0	FDD
27	857.0	824.0	852.0	803.0	FDD
28	703.0	748.0	758.0	803.0	FDD
29	N/A	N/A	717.0	728.0	FDD
30	2305.0	2315.0	2350.0	2360.0	FDD
31	452.5	457.5	462.5	467.5	FDD
32	N/A	N/A	1832.0	1496.0	FDD
33	1900.0	1920.0	1900.0	1920.0	TDD
34	2010.0	2025.0	2010.0	2025.0	TDD
35	1850.0	1910.0	1850.0	1910.0	TDD
36	1980.0	1990.0	1980.0	1990.0	TDD
37	1930.0	1930.0	1930.0	1930.0	TDD
38	2570.0	2620.0	2570.0	2620.0	TDD
39	1880.0	1920.0	1880.0	1920.0	TDD

CH	$f_{UL,low}$ MHz	$f_{UL,high}$ MHz	$f_{DL,low}$ MHz	$f_{DL,high}$ MHz	Mode
40	2300.0	2400.0	2300.0	2400.0	TDD
41	2496.0	2690.0	2496.0	2690.0	TDD
42	3400.0	3600.0	3400.0	3600.0	TDD
43	3600.0	3800.0	3600.0	3800.0	TDD
44	703.0	803.0	703.0	803.0	TDD
45	1447.0	1467.0	1447.0	1467.0	TDD
46	5150.0	5925.0	5150.0	5925.0	TDD
47	5855.0	5925.0	5855.0	5925.0	TDD
48	3550.0	3700.0	3550.0	3700.0	TDD
49	3550.0	3700.0	3550.0	3700.0	TDD
50	1432.0	1517.0	1432.0	1517.0	TDD
51	1427.0	1432.0	1432.0	1432.0	TDD
52	3300.0	3400.0	3300.0	3400.0	TDD
65	1920.0	2010.0	2110.0	2200.0	FDD
66	1710.0	1780.0	2110.0	2200.0	FDD
67	N/A	N/A	738.0	758.0	FDD
68	698.0	728.0	753.0	783.0	FDD
69	N/A	N/A	2570.0	2620.0	FDD
70	1695.0	1710.0	1995.0	2020.0	FDD
71	663.0	698.0	617.0	652.0	FDD
72	451.0	456.0	461.0	466.0	FDD
73	450.0	455.0	460.0	465.0	FDD
74	1427.0	1470.0	1475.0	1518.0	FDD
75	N/A	N/A	1432.0	1517.0	FDD
76	N/A	N/A	1427.0	1432.0	FDD
85	698.0	716.0	728.0	746.0	FDD

Tabla 4: bandas frecuenciales basadas para LTE [3GPP TS 36.104]

El ancho de banda de LTE puede ser de 1.4, 5, 10, 15 o 20MHz, dependiendo del número de banda. La agregación de portadoras proporciona medios adicionales para combinar estas bandas para lograr un ancho de banda total más amplio por usuario individual.

Las bandas de frecuencia 5G NR pueden verse en la tabla 4., se comparten con las bandas LTE (bandas 5G n1– n76 y 4G LTE bandas 1-76), mientras que el resto de las bandas 5G NR son nuevas (n77-n84 y n257, n258 y n260).

Como ha sido el caso con el desarrollo de LTE, se puede esperar que haya multitud de nuevas bandas operativas 5G y anchos de banda de canal a medida que estén disponibles las nuevas versiones 3GPP.

CH	$f_{UL,low}$ MHz	$f_{UL,high}$ MHz	$f_{DL,low}$ MHz	$f_{DL,high}$ MHz	Mode
n1	1920.0	1980.0	2110.0	2170.0	FDD
n2	1850.0	1910.0	1930.0	1990.0	FDD
n3	1710.0	1785.0	1805.0	1880.0	FDD
n5	824.0	849.0	869.0	894.0	FDD
n7	2500.0	2570.0	2620.0	2690.0	FDD
n8	880.0	915.0	925.0	960.0	FDD
n20	832.0	862.0	791.0	821.0	FDD
n28	703.0	748.0	758.0	803.0	FDD
n38	2570.0	2620.0	2570.0	2620.0	TDD
n41	2496.0	2690.0	2496.0	2690.0	TDD
n50	1432.0	1517.0	1432.0	1517.0	TDD
n51	1427.0	1432.0	1432.0	1432.0	TDD
n66	1710.0	1780.0	2110.0	2200.0	FDD
n70	1695.0	1710.0	1995.0	2020.0	FDD
n71	663.0	698.0	617.0	652.0	FDD
n74	1427.0	1470.0	1475.0	1518.0	FDD
n75	N/A	N/A	1432.0	1517.0	SDL
n76	N/A	N/A	1427.0	1432.0	SDL
n77	3300.0	4200.0	3300.0	4200.0	TDD
n78	3300.0	3800.0	3300.0	3800.0	TDD
n79	4400.0	5000.0	4400.0	5000.0	TDD
n80	1710.0	1785.0	N/A	N/A	SUL
n81	880.0	915.0	N/A	N/A	SUL
n82	832.0	862.0	N/A	N/A	SUL
n83	703.0	748.0	N/A	N/A	SUL
n84	1920.0	1980.0	N/A	N/A	SUL
n257	26 500.0	29 500.0	26 500.0	29 500.0	TDD
n258	24 250.0	27 500.0	24 250.0	27 500.0	TDD
n260	37 000.0	40 000.0	37 000.0	40 000.0	TDD

Tabla 5: bandas frecuenciales para 5G [3GPP TS 38.104]

3GPP se refiere a esta división en bandas de menos de 6 GHz y las bandas por encima de 6 GHz como Rango de frecuencia 1 y Rango de frecuencia 2, respectivamente. Más específicamente, FR1 cubre las frecuencias en el rango de 450 MHz a 6 GHz, mientras que FR2 se refiere a las frecuencias dentro de 24,250 a 52,600 GHz; por ejemplo, las bandas n257, n258 y n260 de la tabla 5.4 pertenecen a FR2; el resto está en FR1.

El 5G NR es capaz de admitir diferentes anchos de banda de canal de equipos de usuario (UE) de una manera flexible mientras opera dentro del ancho de banda del canal de la estación base (BS). La estación base puede transmitir y / o recibir desde una o más partes de ancho de banda de UE tal como establece el 3GPP 38.104.

Se especifican múltiples configuraciones de ancho de banda de transmisión NRB por ancho de banda de canal de estación base y el respectivo espaciado de subportadoras para FR1 y FR2. Las configuraciones de ancho de banda de transmisión TR1 pueden tener valores de ancho de banda de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100MHz, mientras que las subportadoras pueden variar entre los valores de 15, 30, y 60 kHz. Para el modo FR2, la configuración de ancho de banda de transmisión puede tener valores de ancho de banda de 50, 100, 200 y 400MHz, mientras que las subportadoras pueden ser de 60 o 120 kHz [TS 38.104]. La Figura 1 muestra las bandas 5G en formato gráfico.

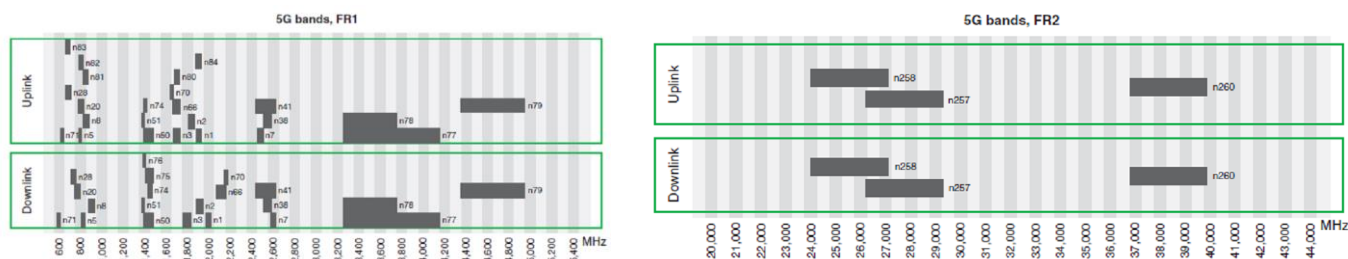


Figura 3: bandas definidas en 3GPP Release 15 [TS 38.104]

3.3 Tecnologías de acceso por radio 5G

La tecnología de radio 5G se define como NR mientras que su red central (CN) se conoce como NGC (núcleo de próxima generación).

3.3.1 Modelado de canales 5G

A medida que las frecuencias de radio actuales se congestionan cada vez más mientras aumentan las tasas de datos y la demanda de capacidad, el 5G requiere nuevas bandas.

La industria de las comunicaciones móviles ha identificado el potencial para el rango de 6 a 100 GHz para las futuras redes 5G, ya que proporciona medios para una alta capacidad y densificación de redes. Debido al corto rango de comunicaciones, este rango es especialmente adecuado para el escenario de implementación de celdas pequeñas. Las nuevas frecuencias altas de hasta 100 GHz también requieren de modelos renovados de propagación de radio [3GPP TR 38.900].

El modelado del canal 5G se basa en mediciones y en el concepto de trazado de rayos.

3.3.2 Principios de la tecnología de radio 5G

En esta sección se describen las tecnologías de radio clave esperadas para el 5G que pueden contribuir a lograr la alta capacidad y el rendimiento de radio para cumplir con los estrictos requisitos de ITU-R IMT-2020.

3.3.2.1 OFDM en 5G

El 3GPP ha elegido la forma de onda CP-OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal de prefijo cíclico) para 5G NR.

El NR y el LTE forman conjuntamente el acceso de radio 5G, apoyándose mutuamente especialmente en la fase inicial del despliegue de 5G.

Mientras LTE continúe soportando bandas de frecuencia por debajo de 6 GHz, el NR tendrá una variedad de bandas en un amplio espectro, desde sub-1 hasta 100 GHz. El beneficio del funcionamiento conjunto de LTE y NR es la posibilidad de lograr ganancia de capacidad vía agregación.

Beneficios de la modulación basada en OFDM

La modulación por multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) se ha seleccionado como base para 5G por varias razones:

- OFDM es eficiente tanto en enlace ascendente (UL) como en enlace descendente (DL) para cumplir con los requisitos de alta velocidad de datos. También el backhaul se beneficia de la técnica de modulación basada en OFDM.
- OFDM proporciona medios para la utilización fluida de MIMO. Proporciona alta eficiencia espectral a través de MIMO de un solo usuario (SU-MIMO) y MIMO de múltiples usuarios (MU-MIMO). Combinado con la tecnología de formación de haz adaptativa, el OFDM contribuye a la compensación de la pérdida de propagación de radio en bandas de alta frecuencia.
- OFDM se puede optimizar para una mejor aplicabilidad a la relación de potencia pico a promedio (PAPR). En los sistemas LTE-Advanced y LTE de la generación anterior, el OFDM se ha seleccionado en el enlace descendente mientras que el enlace ascendente se basa en el acceso de multiplexación por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA), que es más adecuado para optimizar la eficiencia energética del dispositivo. El PAPR de OFDM en 5G se puede reducir aplicando técnicas de reducción de PAPR con un impacto menor en el rendimiento.
- En los casos de uso de alta velocidad se requiere solidez en la selectividad de tiempo del canal y OFDM apoya esto mediante un ajuste adecuado del espaciado de subportadoras. Se puede suponer que las bandas de frecuencia más alta se utilizarán para celdas pequeñas. También se puede esperar que aumente la importancia del backhaul móvil (V2X) y la resistencia al ruido de fase mediante una elección adecuada del espaciado de subportadoras.
- La complejidad de la banda base de un receptor OFDM es baja.
- El prefijo cíclico OFDM (CP) lo hace resistente a errores de sincronización de tiempo.
- OFDM es una forma de onda flexible, por lo que admite una variedad de casos de uso y servicios en una amplia gama de frecuencias cuando el espaciado de subportadoras y el prefijo cíclico se ajustan adecuadamente.

Principio de OFDM

Después de la evaluación de nuevos candidatos a formas de onda 5G, se seleccionó el OFDM, ya que su rendimiento ha sido probado en la práctica. Aún se puede optimizar más para hacer frente a los estrictos requisitos de 5G.

El OFDM se refiere a la tecnología que divide una banda de frecuencia amplia en varias frecuencias estrechas, es decir, subportadoras que transportan los datos reales entre el transmisor y el receptor. La multiplexación se encarga de la transmisión simultánea de los datos en cada subportadora individual. En los sistemas LTE y LTE-Advanced, las subportadoras tienen un ancho fijo de 15 kHz y, según la necesidad de la velocidad de datos. La idea de utilizar las subportadoras es obtener un canal de radio que sea aproximadamente constante (plano) en cada subbanda dada, lo que minimiza los efectos negativos del desvanecimiento, ya que la banda desvanecida suele ser muy estrecha y la subportadora se puede reasignar durante el desvanecimiento. Este principio hace que la ecualización sea mucho más sencilla en el receptor en comparación con las técnicas anteriores utilizadas en 2G, 3G y 4G.

El tiempo de duración del símbolo OFDM es $1 / \Delta f + \text{prefijo cíclico (CP)}$. El prefijo cíclico se utiliza para mantener la ortogonalidad entre las subportadoras incluso para un canal de radio de dispersión en el tiempo. En LTE, un solo elemento de recurso transporta los datos mediante el uso de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), 16QAM (modulación de amplitud en cuadratura) o modulación 64QAM.

La Figura 2 muestra la diferencia entre 3G con un ancho de banda fijo de 5MHz, que se comparte entre todos los usuarios admitidos en base a la multiplexación por división de código, y el ancho de banda flexible LTE, que tiene una granularidad más fina para definir la banda de frecuencia; Es posible desplegar bandas de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20MHz en LTE, y además combinar las bandas a través del concepto de agregación de portadoras. Como se puede ver, uno de los beneficios de OFDM sobre el acceso múltiple por división de código (CDMA) es la asignación dinámica de las subportadoras, que puede optimizar la regeneración de la banda de frecuencia entre LTE y otras.

La figura también presenta el principio TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo) del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), que, de hecho, es una combinación de TDMA y Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) es una combinación de TDMA y Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) formada por ocho intervalos de tiempo, o sus recursos subdivididos por cada portadora de 200 kHz.

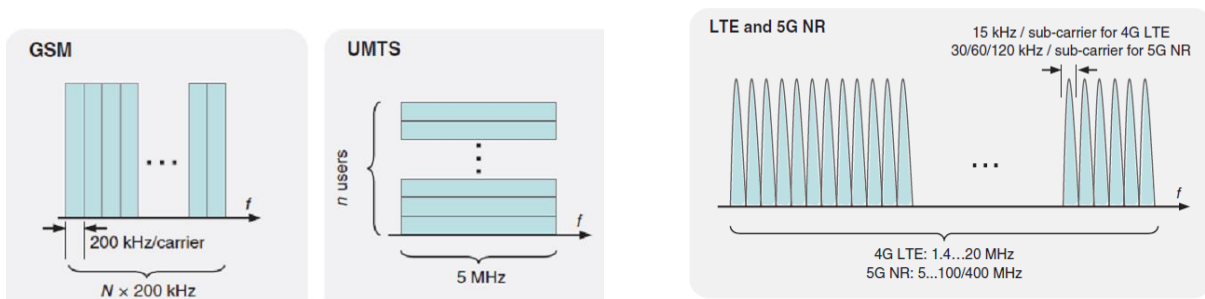


Figura 4: diferencias entre anchos de banda [TS 38.104]

Para 5G NR, el ancho de banda puede variar de manera más amplia, desde 5 hasta 100 o 400MHz, según el escenario.

OFDM se basa en Multiplexación por división de frecuencia (FDM). En FDM, los diferentes flujos de información se mapean en canales de frecuencia paralelos separados. OFDM se diferencia del FDM tradicional en los siguientes aspectos:

- El mismo flujo de información se mapeó en muchas subportadoras de banda estrecha, aumentando el período de símbolo en comparación con los esquemas de una sola portadora.
- Las subportadoras son ortogonales entre sí para reducir la interferencia entre portadoras (ICI). Además, se permite la superposición entre subportadoras para proporcionar una alta eficiencia espectral.
- Se agrega un intervalo de guarda, a menudo llamado prefijo cíclico, al comienzo de cada símbolo OFDM para preservar la ortogonalidad entre subportadoras y eliminar la interferencia entre símbolos (ISI) e ICI (ver Figuras 3 y 4).

En el dominio de la frecuencia, la superposición entre subportadoras puede tener lugar ya que son ortogonales entre sí.

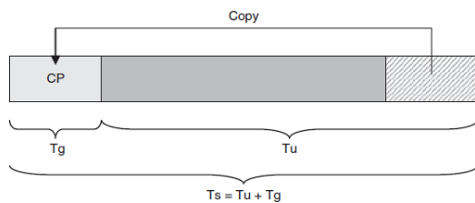


Figura 5: principal prefijo de OFDM [TS 38.104]

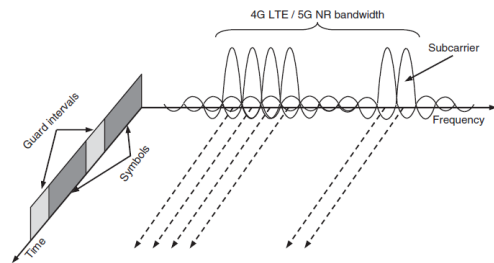


Figura 6: interpretación en frecuencia de una señal OFDM [TS 38.104]

3.3.3 Prefijo cíclico

Se agrega un intervalo de guarda al comienzo de cada símbolo OFDM para minimizar el impacto negativo del canal multitrayecto. Si la duración del intervalo de guarda T_g es mayor que el retardo máximo del canal τ_{max} , todos los componentes multitrayecto llegarán dentro de este tiempo de guarda y el símbolo útil no se verá afectado evitando ISI como se puede ver en la Figura 6.

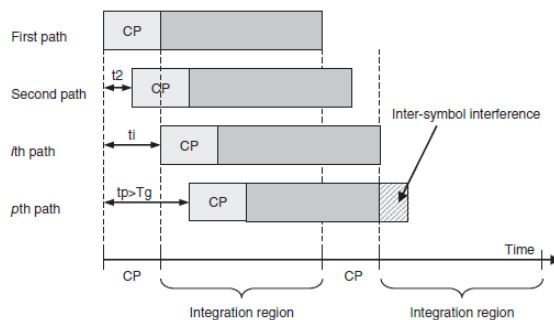


Figura 7: prefijo cíclico (CP) evitando ISI [TS 38.104]

Una particularización del intervalo de guarda es el llamado prefijo cíclico. En este caso, las últimas muestras N_g del símbolo OFDM útil con N muestras se copian al comienzo del mismo símbolo. Dado que el número de ciclos de cada función de ortogonalidad por símbolo OFDM se mantendrá como un número entero, esta estrategia también permite mantener las propiedades de ortogonalidad de las subportadoras transmitidas evitando ICI. La figura 6 muestra el concepto de prefijo cíclico donde:

$$\begin{aligned}
T_u &= N \times T_0 \\
T_g &= N_g \times T_0 \\
T_s &= (N + N_g) \times T_0
\end{aligned} \tag{1}$$

Las variables se refieren a lo siguiente:

T_u es el símbolo OFDM útil donde se asignan los símbolos de datos, T_g es la duración del prefijo cíclico y T_s es la duración total del símbolo OFDM. La inserción del CP da como resultado la pérdida de eficiencia espectral (SEL), lo cual no es relevante en comparación con los beneficios que proporciona en términos de robustez de ISI e ICI. El SEL se puede interpretar como la pérdida de rendimiento que sufrirá el sistema de transmisión OFDM por la adición del prefijo cíclico, y se puede presentar como:

$$SEL = \frac{T_g}{T_g + T_u} \tag{2}$$

La pérdida de eficiencia espectral está directamente relacionada con la relación entre la duración del CP y la duración total de un símbolo OFDM.

3.3.4 Estimación y ecualización de canales

En los sistemas OFDM inalámbricos, los símbolos recibidos han sido corrompidos por el canal multitrayecto. Para deshacer estos efectos se debe realizar una ecualización de la señal recibida que de alguna manera compense las variaciones introducidas por el canal.

Si el CP es más largo que el retardo máximo del canal cada símbolo de subportadora se multiplica por un número complejo igual al coeficiente de la función de transferencia de canal en esta frecuencia de subportadora. En otras palabras, cada subportadora experimenta una ganancia compleja debido al canal. Para deshacer estos efectos, se requiere una única multiplicación compleja para cada subportadora produzca una ecualización de baja complejidad en el dominio de la frecuencia donde:

$$y[k] = \frac{z[k]}{h[k]} = d[k] + \frac{w[k]}{h[k]} \tag{3}$$

$y[k]$ es el símbolo ecualizado en la k -ésima subportadora.

$z[k]$ es el símbolo recibido en la k -ésima subportadora después de FFT.

$h[k]$ es la ganancia de canal complejo en la subportadora k .

$w[k]$ representa el ruido gaussiano blanco aditivo en la subportadora k .

Nótese que esta ecualización se ha realizado asumiendo un conocimiento perfecto del canal. Por lo tanto, el ecualizador necesita un estimador de canal que proporcione al bloque de ecualización la información requerida sobre las características del canal.

Para estimar el canal de radio móvil en los sistemas OFDM, se usa la técnica de estimación de canal asistida por piloto. Esta técnica consiste en transmitir símbolos, a menudo llamados símbolos piloto, conocidos tanto por el transmisor como por el receptor para estimar el canal en el receptor. Este enfoque presenta una compensación importante entre el número de pilotos utilizados y la eficiencia de transmisión.

Cuanto más pilotos se utilicen, más precisa será la estimación, pero también se transmitirá más sobrecarga reduciendo la velocidad de datos.

A modo de ejemplo, las Figuras 8 – 9 muestran el mapeo de señales de referencia específicas de celda en LTE para diferentes números de puertos de antena y con CP normal. Los símbolos piloto se distribuyen en el dominio de la frecuencia y el tiempo y son ortogonales entre sí para proporcionar una estimación precisa del canal.

La Figura 8 muestra la idea del bloque de recursos de radio LTE, y las siguientes figuras muestran el mapeo de las señales de referencia (Figura 10).

En 5G, también existe una configuración de puertos de 8 x 8.

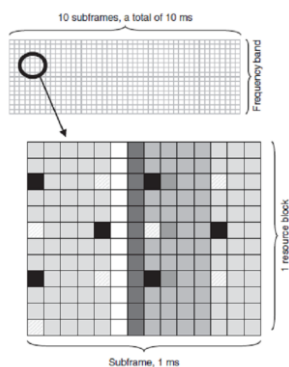


Figura 8: Formación de bloque de recursos LTE [TS 38.104]

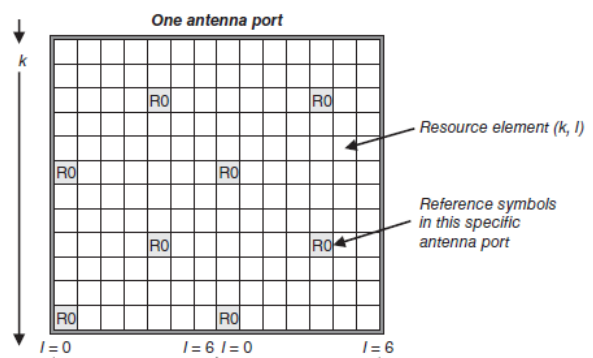


Figura 9: Mapeo de señales de referencia específicas de celda de enlace descendente en LTE con CP normal, es decir, en una configuración del puerto de antena de LTE [TS 38.104]

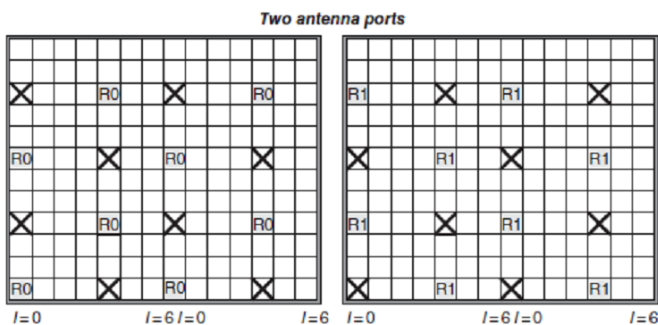


Figura 10: MIMO de dos puertos en LTE. La cruz indica los elementos de recurso que no se utilizan en el puerto de antena respectivo [TS 38.104].

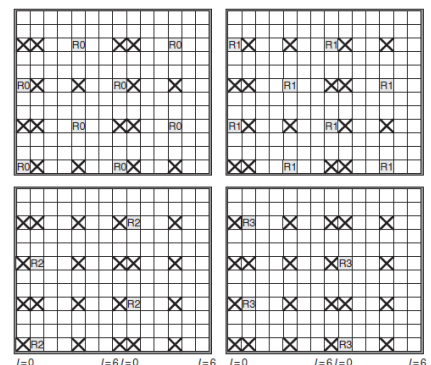


Figura 11: configuración de puerto para 4 antenas [TS 38.104].

3.3.5 Modulación

LTE puede usar esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM como se muestra en la Figura 11, mientras que 5G tiene la opción de utilizar hasta 256QAM. La estimación de canal de OFDM generalmente se realiza con la ayuda de símbolos piloto.

El tipo de canal para cada subportadora OFDM individual corresponde al desvanecimiento plano. La modulación asistida por símbolo piloto en canales de desvanecimiento plano implica la inserción escasa de símbolos piloto conocidos en un flujo de símbolos de datos.

La modulación QPSK proporciona las áreas de cobertura más grande pero con la menor capacidad por ancho de banda. 64-QAM da como resultado una cobertura más pequeña, pero ofrece más capacidad.

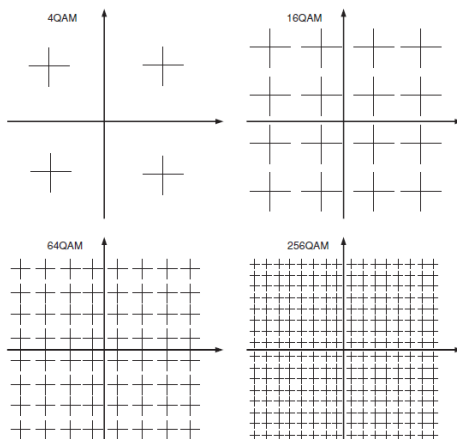


Figura 12: La constelación I / Q de QPSK (4QAM) y un conjunto de otras variantes de QAM relevantes para 5G [TS 38.104].

3.3.6 Codificación

LTE utiliza codificación Turbo o codificación convolucional, siendo la primera más moderna y proporciona una ganancia de aproximadamente 3 dB sobre la anterior y menos efectiva, pero al mismo tiempo una codificación convolucional más robusta. 5G optimiza aún más la codificación al introducir esquemas de codificación resumidos en la Tabla 2.

La creación de la señal OFDM se basa en el IFFT, que es la transformada discreta de Fourier (DFT) y relativamente fácil de implementar ya que existen componentes estándar para el cálculo de la transformada. La recepción utiliza, por otro lado, el FFT para combinar la señal original.

3.4 Enlace ascendente 5G: CP-OFDM y DFT-s-OFDM

La forma de onda de transmisión de enlace descendente de la interfaz de radio 5G es OFDM que utiliza un prefijo cíclico, que se denomina CP-OFDM. La forma de onda de transmisión de enlace ascendente de 5G, es OFDM y utiliza un prefijo cíclico con una función de codificación de transformación que realiza un ensanchamiento DFT que puede desactivarse o activarse, lo que se conoce como DFT-s-OFDM.

La diferencia entre la multiplexación 5G y LTE / LTE-A surge en el enlace ascendente; en lugar del SC-TDMA, el 5G se basa en OFDM tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente. La difusión de DFT que se puede aplicar en el enlace ascendente 5G optimiza el rendimiento de PAPR, el que fue la razón para seleccionar el SC-TDMA de primera mano en LTE / LTE-A ya que el OFDM convencional no es óptimo para él, especialmente en los casos de uso que requieren bajo consumo de batería, como dispositivos IoT de baja potencia [3GPP TS 38.300].

3.5 Enlace descendente

5G admite una multiplexación espacial basada en DMRS (señal de referencia de demodulación) de bucle cerrado para el canal compartido de enlace descendente físico (PDSCH). Además, se admiten hasta 8 y 12 puertos DL DMRS ortogonales para DMRS tipo 1 y tipo 2, respectivamente.

Se admiten hasta ocho puertos DL DMRS ortogonales para cada UE para SU-MIMO y hasta cuatro puertos DL DMRS ortogonales para cada UE se admiten para MU-MIMO.

El procesamiento de la capa física del enlace descendente de los canales de transporte incluye los siguientes pasos [3GPP TS 38.300]:

- Conexión del bloque de transporte CRC (verificación de redundancia cíclica);
- Segmentación de bloque de código y conexión CRC de bloque de código;
- Codificación de canal basada en LDPC (comprobación de paridad de baja densidad);
- Procesamiento ARQ híbrido de capa física y adaptación de velocidad;
- Entrelazado de bits;
- Esquemas de modulación QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM;
- Mapeo y precodificación de capas;
- Mapeo de recursos asignados y puertos de antena.

3.5.1 MIMO avanzado

Los sistemas de antena MIMO son una parte integral de las implementaciones 4G actuales, por lo que se puede suponer que la evolución de MIMO continúa también en la era 5G.

Los sistemas de antena MIMO proporcionan un patrón de antena altamente directivo que se forma de forma dinámica. Se supone que 5G NR empleará cientos de elementos de antena para aumentar el rendimiento; esto no era posible con los sistemas de comunicaciones móviles anteriores.

El concepto MIMO también está estrechamente relacionado con la formación del haz de la antena del transmisor y del receptor para mejorar aún más el rendimiento y limitar las interferencias.

La formación de haces no solo es útil para altas frecuencias, sino que se puede suponer que forma una base importante para muchos escenarios de baja frecuencia para extender la cobertura y proporcionar velocidades de datos más altas.

3.6 Nueva interfaz de radio (NR) de 3GPP

Esta sección analiza la comprensión actual del diseño 3GPP propuesto y cómo aborda los requisitos y los casos de uso del UIT-R donde se definen las siguientes funcionalidades y principios clave 5G [3GPP 38.300]:

- Arquitectura de protocolo y división funcional
- Interfaces
- Arquitectura de protocolo de radio
- Canales y procedimientos en uplink y downlink
- Control de acceso medio (MAC), Control de enlace de radio (RLC), Convergencia de datos de paquetes
- Capas de protocolo (PDCP) y control de recursos de radio (RRC)
- Movilidad y estados
- Planificación
- Funciones y capacidades clave de UE
- Calidad de servicio (QoS)

- Seguridad
- Autoconfiguración y auto optimización

La red de radio del 5G tiene su propio camino de evolución donde el paso intermedio se denomina no autónomo (NSA) y a la estación base se le denomina ng-eNB.

3.6.1 Elementos de la red 5G

3.6.1.1 gNB y ng-NB

La Figura 13 muestra la arquitectura NG-RAN de 5G.

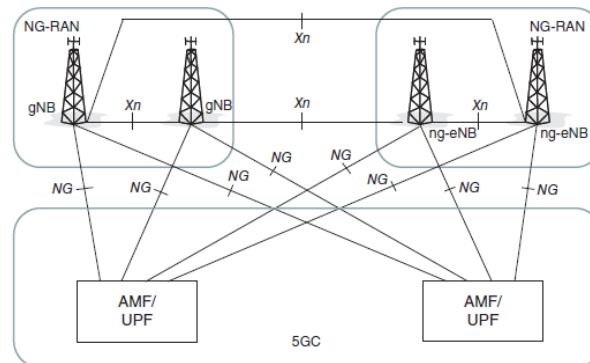


Figura 13: Arquitectura de red 5G [TS 23.501].

El gNB (NodoB 5G independiente) y el ng-eNB (NodoB 4G no independiente) albergan las siguientes funciones:

- Gestión de recursos de radio (RRM)
- Gestión de encabezados IP
- Gestión de AMF
- Funcionalidades de enrutamiento
- Configuración y liberación de la conexión
- Funcionalidad de programación
- Mediciones
- Marcado de paquetes
- Gestión de sesiones
- Segmentación de red
- Funciones de QoS
- Soporte de UE en estado RRC_INACTIVE
- Función de distribución de mensajes NAS
- Uso compartido de la red de acceso por radio
- Conectividad dual
- Estrecho interfuncionamiento entre NR y E-UTRA

3.6.1.2 AMF

La AMF se refiere a la función de gestión de acceso y movilidad [3GPP TS 23.501]:

- Terminación de señalización NAS
- Seguridad de señalización NAS
- AS control de seguridad

- Señalización entre nodos CN para movilidad entre redes de acceso 3GPP
- Accesibilidad de UE en modo inactivo (incluido el control y la ejecución de la retransmisión de búsqueda)
- Gestión del área de registro
- Soporte de movilidad intra e intersistema
- Autenticación de acceso
- Autorización de acceso, incluida la verificación de los derechos de itinerancia
- Control de gestión de movilidad (suscripción y políticas)
- Soporte de corte de red
- Selección de la función de gestión de sesiones (SMF)

3.6.1.3 UPF

La UPF se refiere a la función del plano de usuario [3GPP TS 23.501]:

- Actúa como un punto de anclaje para la movilidad intra e inter-RAT
- Es el punto de sesión de la unidad de datos en paquetes (PDU) externa de interconexión a la red de datos
- Realiza el enrutamiento y reenvío de paquetes, la inspección de paquetes y actúa en el plano del usuario como parte de la aplicación de reglas de políticas
- Formular informes de uso del tráfico
- El clasificador de enlace ascendente admite el enrutamiento de los flujos de tráfico a una red de datos
- El punto de bifurcación admite sesiones de PDU con múltiples hosts
- Gestiona el manejo de QoS para el plano del usuario
- Realiza verificación de tráfico de enlace ascendente, siendo SDF (flujo de datos de servicio) a mapeo de flujo de QoS
- Almacena en búfer los paquetes de enlace descendente y activa la notificación de datos de enlace descendente

3.6.1.4 SMF

El SMF aloja las siguientes funciones principales [3GPP TS 23.501]:

- Administra la sesión
- Asigna y administra direcciones IP de UE
- Selecciona y controla la función UP
- Configura la dirección del tráfico en la UPF dirigiendo el tráfico al destino adecuado
- Gestiona parte del control de la aplicación de políticas y QoS
- Se encarga de la notificación de datos de enlace descendente

3.6.2 Estructura de la trama

En esta sección se describen los canales 5G y los procedimientos tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente [3GPP TS 38.211].

En 5G, las transmisiones de enlace descendente y ascendente se organizan en tramas, que se derivan de la estructura OFDM. Un solo cuadro tiene una duración de:

$$T_f = (\Delta f_{\max} N_f / 100) \cdot T_c = 10 \text{ ms} \quad (4)$$

Cada cuadro tiene 10 subtramas. Una subestructura individual tiene una duración de:

$$T_{sf} = (\Delta f_{\max} N_f / 1000) \cdot T_c = 1 \text{ ms} \quad (5)$$

El número de símbolos OFDM consecutivos por subtrama varía, dependiendo del número del símbolo y la ranura. Además, cada trama se divide en dos medias tramas de cinco subtramas cada una, con la mitad 0 que consta de subtramas 0–4 y la mitad 1 que consta de subtramas 5–9 [3GPP TS 38.133 y TS 38.213].

3.6.3 Canales físicos

3.6.3.1 Enlace ascendente

Un canal físico de enlace ascendente se refiere a un conjunto de elementos de recursos que transportan información que se origina en capas superiores. 3GPP ha definido los siguientes canales físicos de enlace ascendente para 5G:

- Canal compartido de enlace ascendente físico (PUSCH)
- Canal de control de enlace ascendente físico (PUCCH)
- Canal físico de acceso aleatorio (PRACH)

La capa física utiliza señales físicas de enlace ascendente que no transportan información procedente de capas superiores. Estas señales físicas de enlace ascendente son las siguientes:

- Señales de referencia de demodulación (DM-RS)
- Señales de referencia de seguimiento de fase (PT-RS)
- Señales de referencia de sondeo (SRS)

El UE usa una estructura de trama y recursos físicos cuando está transmitiendo en enlace ascendente. Además, se define un conjunto de puertos de antena que se aplican en el enlace ascendente.

3.6.3.2 Enlace descendente

Un canal físico de enlace descendente se refiere a un conjunto de elementos de recursos que transportan información procedente de capas superiores. 5G define los siguientes canales físicos de enlace descendente:

- Canal compartido de enlace descendente físico (PDSCH)
- Canal de transmisión físico (PBCH)
- Canal de control de enlace descendente físico (PDCCH)

Una señal física de enlace descendente se refiere a un conjunto de elementos de recursos que utiliza la capa física, pero estos no transportan información procedente de capas superiores. Las señales físicas del enlace descendente son las siguientes:

- Señales de referencia de demodulación (DM-RS) para PDSCH y PBCH
- Señales de referencia de seguimiento de fase (PT-RS)

- Señal de referencia de información de estado de canal (CSI-RS)
- Señal de sincronización primaria (PSS)
- Señal de sincronización secundaria (SSS)

3.6.4 Acceso múltiple

El esquema de acceso múltiple para la capa física NR se basa en OFDM con un CP.

Para el enlace ascendente, también se admite OFDM discreta por transformación de Fourier (DFT-s-OFDM) con un CP.

Para admitir la transmisión en espectro emparejado y no emparejado, se habilitan tanto el duplex por división de frecuencia (FDD) como el TDD.

La capa 1 se basa en bloques de recursos, lo que proporciona medios para que la capa 1 de 5G NR utilice una gran cantidad de asignaciones de espectro. El bloque de recursos se basa en hasta 12 subportadoras.

La duración de la trama de radio es de 10 ms. Contiene 10 subtramas, y la duración de cada una es de 1 ms. Una subtrama tiene una o más ranuras adyacentes, de las cuales cada una tiene 14 símbolos adyacentes.

3.7 Escenarios de despliegue

Estos escenarios son [El 3GPP TR38.801]:

- No centralizado
- Co-ubicado con E-UTRA
- Centralizado
- Red de acceso de radio compartida (RAN)
- Despliegue heterogéneo

Como punto de vista alternativo, los escenarios de alto nivel se pueden categorizar en dos casos: implementaciones no autónomas (NSA) y autónomas [Anexo J de 3GPP TR 23.799].

3.7.1 No centralizado

Este escenario se refiere a un conjunto de elementos 5G NodeB (gNB) equipados con una pila de protocolos completa. Es adecuado especialmente en implementaciones de macroceldas y puntos de acceso en interiores.

Los elementos gNB pueden conectarse con otros elementos gNB o elementos LTE eNB y eLTE eNB.

El eLTE eNB es la versión evolucionada de eNB que admite conectividad tanto con el núcleo de paquete mejorado 4G (EPC) como con el núcleo de próxima generación 5G (NGC) (Ver figura 15).

3.7.2 Co-ubicado con E-UTRA

En este escenario de implementación compartida, la funcionalidad 5G NR se ubica junto con la funcionalidad 4G E-UTRA como parte de la estación base o como varias estaciones base en el mismo sitio. Es adecuado para cualquier tipo de celda, incluida la macro urbana.

El equilibrio de carga trabaja para optimizar la utilización de los recursos del espectro para las tecnologías de acceso por radio de tal manera que se puedan aplicar las frecuencias más bajas para asegurar la cobertura constante en el borde de la celda, mientras que las frecuencias más altas aseguran las velocidades óptimas de datos del usuario (Ver Figura 16).

3.7.3 Implementación centralizada

El 5G NR admite la centralización de las capas superiores de los protocolos de radio NR.

Como se ve en la Figura 17, varios elementos gNB se pueden unir a la unidad centralizada a través del transporte. El rendimiento de la capa de transporte entre las capas inferiores de los elementos gNB y el elemento centralizado se puede configurar de manera diferente según el caso.

En este escenario, se pueden aplicar escenarios de implementación no compartidos y compartidos con E-UTRA. Estos casos incluyen:

- **Transporte de alto rendimiento**, como red óptica y capas inferiores de elementos gNB. Proporciona beneficios para escenarios avanzados de multipunto coordinado (CoMP) y para la optimización de la programación que proporciona una alta capacidad.
- **Transporte de bajo rendimiento**, con un rendimiento menos exigente en términos de ancho de banda, retardo, sincronización y jitter, y capas inferiores de elementos gNB. Este escenario es posible porque las capas de protocolo superiores tienen requisitos de rendimiento más bajos para la capa de transporte.

3.7.4 RAN compartida

El 5G NR admite el escenario de implementación de RAN compartida aplicable para la cooperación entre varios operadores de red central. Además de la compartición de áreas de servicio que pueden variar desde la cobertura localizada hasta cobertura nacional, los operadores también pueden tener sus áreas de servicio individuales adyacentes a las compartidas.

También es posible implementar áreas de servicio RAN heterogéneas, que pueden ser óptimas para ubicaciones como implementaciones en interiores. Esto se debe al requisito de un inter funcionamiento fluido entre la RAN compartida y la RAN no compartida. (Ver Figura 18).

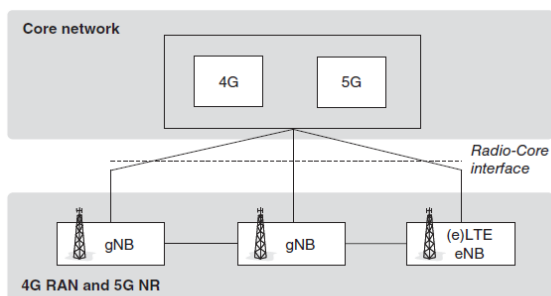


Figura 14 escenario de despliegue no centralizado [TS 23.501]

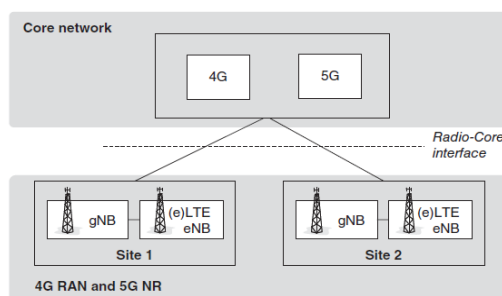


Figura 15: escenario de despliegue co-ubicado con E-UTRA [TS 23.501]

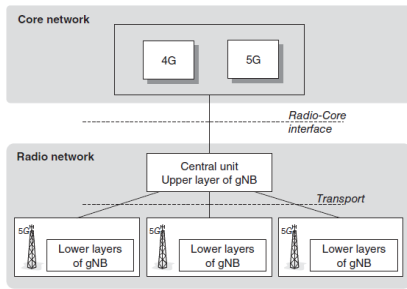


Figura 16: escenario de despliegue centralizado [TS 23.501]

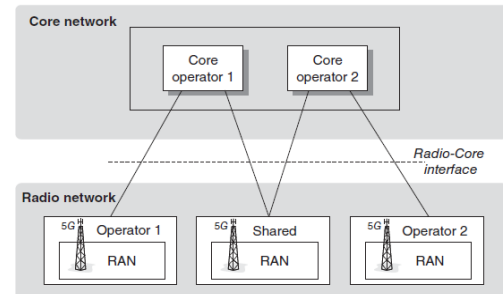


Figura 17: escenario de despliegue compartido [TS 23.501]

3.7.5 Despliegue heterogéneo

Una implementación heterogénea se refiere a un conjunto de más de un escenario descrito anteriormente en las Secciones 3.7.1–3.7.2 dentro de la misma área geográfica.

3.8 Escenarios de implementación autónomos y no autónomos

El sistema 5G proporciona a los operadores de redes móviles (MNO) varias opciones de implementación para allanar el camino para la evolución gradual de 5G. El aspecto clave en esto es la posibilidad de confiar en la infraestructura 4G mientras se construye la infraestructura 5G totalmente nativa.

El 5G nativo se refiere a la arquitectura de red independiente en la que el 5G NR está conectado directamente al núcleo 5G, es decir, NGC.

Las opciones no independientes se refieren a diferentes escenarios en los que cooperan las tecnologías de acceso por radio 4G y 5G, es decir, E-UTRA y NR, respectivamente, así como las redes centrales 4G y 5G.

Los escenarios más relevantes para implementar las interfaces entre el acceso por radio y las redes centrales son los siguientes [3GPP TS 23.799]:

- Opción 2: El 5G NR gNB independiente está conectado al 5G NGC.
- Opción 3 / 3A: el LTE eNB está conectado al 4G EPC con NR no autónomo. El plano de usuario NR (UP) está conectado al EPC a través del LTE eNB (Opción 3) o directamente (Opción 3A).
- Opción 4 / 4A: el 5G NR gNB se conecta al 5G NGC con E-UTRA no autónomo. El plano de usuario E-UTRA se conecta al NGC a través del gNB (Opción 4) o directamente (Opción 4A).
- Opción 5: el eLTE eNB está conectado al NGC. (opción no priorizada en las últimas especificaciones 3GPP).
- Opción 7 / 7A: el eLTE eNB se conecta al NGC con NR no autónomo. La conexión del plano de usuario NR al NGC se realiza a través del eLTE eNB (Opción 7) o directamente (Opción 7A).

Las interfaces que se muestran en las siguientes secciones se refieren a:

- NG1 está diseñado para el plano de control entre el 5G UE y el 5G Core.
- NG2 está diseñado para el plano de control entre 5G RAN y 5G Core.
- NG3 está diseñado para el plano de usuario entre 5G RAN y 5G Core.

3.8.1 4G / 5G RAN y NGC independientes

Hace referencia a 4G E-UTRAN o 5G NR y 5G NGC, que están conectados directamente entre sí mientras que la infraestructura 4G no participa en las comunicaciones 5G [3GPP TS 23.799] (Ver Figura 19).

En este escenario, la interfaz NG1 es el punto de referencia del plano de control para 5G UE y el núcleo 5G. La interfaz NG2 es el punto de referencia del plano de control para el núcleo 5G NR y 5G, mientras que la interfaz NG3 es el punto de referencia del plano de usuario para el 5G NR y núcleo 5G.

El escenario con 4G E-UTRAN conectado al 5G NGC es similar al 5G NR y 5G NGC...se llama independiente porque no se necesitan nuevos requisitos para el soporte de EPC o E-UTRAN heredados.

Este escenario con acceso de radio 5G NR y 5G NGC recién definidos es relevante cuando los sistemas de acceso NR se implementan en áreas sin la presencia de la infraestructura EPC y Long Term Evolution (LTE) heredada (Ver Figura 19).

3.8.2 5G NR no autónomo con 4G EPS

El 4G E-UTRAN se puede utilizar en una arquitectura de conectividad dual de tal manera que el 4G eNB representa un portador de componentes de anclaje para el usuario y el plano de control.

El acceso 5G NR representa un portador de componentes secundarios y utiliza únicamente el plano de control. Este escenario se refiere a una arquitectura no autónoma porque las funciones de red eNB y EPC heredadas son necesarias para el despliegue del plano de usuario del acceso NR.

Este escenario se puede dividir en dos partes:

- Opción 3: que entrega el tráfico del plano de usuario desde el acceso NR a través de 4G eNB, que lo enruta a EPC.
- Opción 3A: donde el tráfico UP se puede enrutar directamente desde el nodo de acceso 5G NR al 4G EPC confiando en la interfaz S1-U. Es adecuado en la implementación temprana de 5G NR cuando la infraestructura heredada de eNB y EPC está disponible y, por lo tanto, la implementación puede basarse en la señalización S1-MME, S1-U y NAS existente. (Figura 10.6)

3.8.3 5G NR no autónomo con 5G NGC

El escenario no autónomo con E-UTRA compatible con el plano de usuario 5G NR, que proporciona conectividad dual se puede realizar en base a 5G NGC en lugar del 4G EPC heredado. Requiere de funciones de red eNB heredadas para admitir el nuevo acceso NR para el plano de usuario. Además, existe la necesidad de actualizar los elementos eNB para admitir las nuevas interfaces NG1, NG2 y NG3 para la conectividad al 5G NGC. Es por eso que el eNB 4G actualizado se conoce como eNB evolucionado.

El modelo base enruta el tráfico del plano de usuario desde la radio NR a través del eNB evolucionado al 5G NGC. En la opción alternativa denominada 7A, el tráfico pasa directamente a través del nodo de acceso 5G NR al 5G NGC.

En la Figura 21 se muestra este escenario, que puede valer la pena considerar cuando los sistemas de acceso 5G NR se implementan en ubicaciones donde ya existe una infraestructura eNB y EPC y están listos para actualizarse o reemplazarse con los elementos eNB evolucionados y el 4G NGC, proporcionando nuevas características con estos nuevos elementos o elementos de red actualizados.

Este escenario es adecuado para la implementación de acceso NR en áreas donde los elementos eNB heredados y el EPC están preparados para la actualización o reemplazo donde los eNB evolucionados asumen el control junto con 5G NGC.

Estos proporcionan un nuevo conjunto de características como base para servicios más avanzados al allanar el camino para los elementos 5G nativos.

3.8.4 E-UTRA 4G no autónomo con 5G NGC

Se basa en la conectividad dual con el nodo de acceso 5G NR que actúa como portador del componente de anclaje para los planos de control y usuario.

El eNB evolucionado tiene la función de portador de componentes secundarios y transfiere solo datos del plano del usuario. La señalización al 5G NGC se realiza a través de las interfaces NG1, NG2 y NG3.

En este escenario (Opción 4), el tráfico del plano de usuario va desde el acceso de radio eNB evolucionado a través del acceso 5G NR y termina en el 5G NGC. Este modo se denomina no autónomo porque las comunicaciones evolucionadas del plano de usuario de eNB requieren acceso al punto de anclaje del 5G NR.

En su Opción alternativa (Opción 4A) el tráfico del plano de usuario va directamente desde el eNB evolucionado al 5G NGC confiando en la interfaz NG3. (Ver Figura 22)

Este escenario proporciona una implementación fluida de los elementos 5G NR en ubicaciones donde ya existe la infraestructura 4G eNB y 4G EPC y se puede actualizar o reemplazar con elementos eNB evolucionados y 5G NGC de tal manera que el acceso 5G NR sería el punto de anclaje de conectividad dual en lugar de 4G. Uno de esos casos puede ser cuando el 5G NR puede utilizar bandas de frecuencia más bajas que los elementos 4G eNB evolucionados.

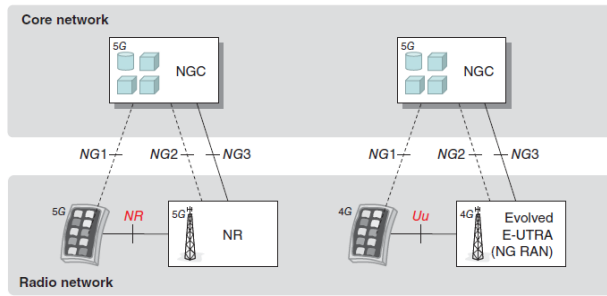


Figura 18: Escenario de implementación independiente para 5G y 4G, que se refiere al NR respectivo o E-UTRA evolucionado conectado al núcleo de próxima generación [3GPP TR 23.799].

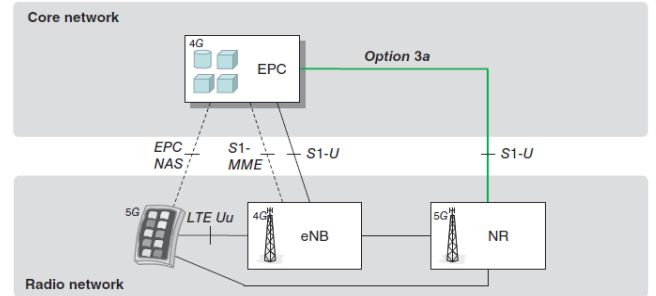


Figura 19: 5G NR y 4G no independientes. La interfaz adicional S1-U como se indica en la figura se refiere a la Opción 3a, mientras que el escenario sin ella se denomina Opción 3 [3GPP TR 23.799].

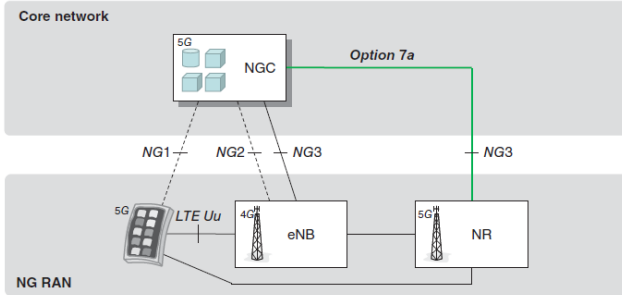


Figura 20: Opción 7 de implementación de 5G no independiente, denominada Opción 7. El escenario con la interfaz NG3 adicional se denomina Opción 7a [3GPP TR 23.799].

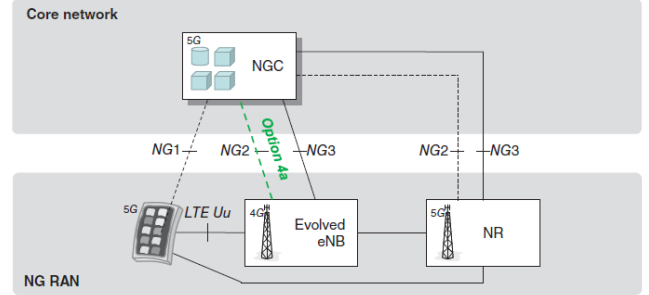


Figura 21: El escenario no autónomo que representa la Opción 4 y 4a, siendo este último del mismo arquitectura como Opción 4, pero con la interfaz NG2 adicional entre eNB y NGC [3GPP TR 23.799].

4. Modelos de propagación 5G

El modelo de propagación que se definirá en este proyecto es el TR 38.901 del 3GPP incluido en la herramienta XIRIO Online. Dicha recomendación provee una serie de directivas sobre propagación en exteriores para sistemas de radiocomunicaciones de corto alcance, en el rango de frecuencias de 500 MHz a 100 GHz, para trayectos LOS y NLOS en una variedad de entornos. Cabe indicar que este nuevo modelo de canal se desarrolla partiendo de modelos de canales anteriores para frecuencias menores a 6 GHz, como el modelo 3D SCM (3GPP TR 36.873) o IMT-Advanced (ITU-R M.2135).

La 3GPP define los siguientes escenarios:

- UMi: microcelda urbana con elevada densidad de UEs. La estación base se encuentra por debajo de los edificios que la rodean.
- UMa: macrocelda urbana con elevada densidad de UEs. La estación base está por encima de los edificios que la rodean.
- RMa: macrocelda rural
- Inh: Interior de Oficinas, abiertas o mixtas.

Aparte del modelo seleccionado podemos destacar otros que actualmente han sido definidos en una primera fase:

- WINNER: Familia de Modelos Estocásticos basados en Geometría donde los parámetros del canal se determinan estocásticamente, basándose en las distribuciones estadísticas extraídas de las mediciones del canal. Son modelos versátiles para frecuencias inferiores a 6 GHz soportados por una gran cantidad de medidas del canal. Adecuado para las simulaciones para estimar canales entre una BS y uno o más equipos de usuario que consideran los datos empíricos. Los parámetros denotan el diferencial omnidireccional de retardo, la propagación de azimut, desvanecimiento por sombra o shadowing, y el factor de Rician.
- COST 2100: siguen un enfoque a nivel de cluster, donde los grupos se clasifican en un entorno simulado y pueden interactuar con uno o más terminales de usuario utilizando el concepto de visibilidad. Cada cluster tiene una región de visibilidad que se extiende sobre un área espacial en el medio. Se determina si un terminal de usuario "ve" al cluster. Así, los usuarios que se encuentran cercanos experimentan condiciones de propagación similares.
- IEEE 802.11ad: destinado a redes de área local inalámbrica (WLAN) de 60 GHz, donde se requieren tasas de datos muy altas. Modelo basado en clusters que describe el canal proporcionando características de espacio-tiempo precisas incluyendo polarización y soporta características no estacionarias del canal.
- METIS: Modelo estocástico y modelo basado en mapas. El primero se refiere a modelos basados en GSCM, donde las distribuciones se extraen de las mediciones del canal y el segundo se basa en técnicas de trazado de rayos con características importantes añadidas y una descripción gruesa del entorno.
- UIT-R P.1411: provee una serie de directivas sobre propagación en exteriores para sistemas

de radiocomunicaciones de corto alcance, en el rango de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz, para trayectos LOS y NLOS en una variedad de entornos. El modelo de estimación de pérdidas descrito en los siguientes párrafos se basa en las directivas de la Sección 4.2.1 de la Recomendación P.1411, y está definido para trayectos NLOS, tanto en entornos urbanos como suburbanos. El tamaño máximo considerado para una celda es de 1 km y el mínimo de 0.02 km. Se trata de un modelo semi-empírico basado en el modelo COST 231 y mejorado por la UIT-R.

Feature	3GPP SCM	WINNER II / WINNER+	IMT-Advanced	3GPP D2D	3GPP 3D	IEEE 802.11ad	METIS Model	
							stochastic	map-based
Frequency Range (GHz)	1 – 3	1 – 6	.45 – 6	1 – 4	1 – 4	60 – 66	up to 70 GHz	up to 100 GHz
Bandwidth (MHz)	5	100	100	100	100	2000	100 MHz < 6 GHz, 1 GHz @ 60 GHz	10 % of the centre frequency
Support massive-MIMO	no	limited	no	no	limited	yes	no	yes
Support spherical waves	no	no	no	no	no	no	no	yes
Support extremely large arrays beyond stationary interval	no	no	no	no	no	no	no	yes
Support dual mobility	no	no	no	limited	no	no	limited	yes
Support Mesh networks	no	no	no	no	no	no	no	yes
Support 3D (elevation)	no	yes	no	no	yes	yes	yes	yes
Support mmW	no	no	no	no	no	yes	partly	yes
Dynamic modelling	no	very limited	no	no	no	limited	no	yes
Spatial consistency	no	no	no	no	no	no	SF only	yes

Tabla 6: Características modelos de propagación 5G [36]

4.1 Escenarios

A continuación se pasara a describir los modelos relacionados con los escenarios de exterior ya que las causísticas del modelo de interior no se abordará en este TFM.

4.1.1 Macrocela Rural (RMa)

En este modelo la altura del transmisor (BS) es elevada, igual a 35 m o superior; y es importante para predecir el comportamiento estadístico de la intensidad de la señal recibida en áreas rurales.

El escenario de implementación rural se enfoca en una cobertura amplia y continua. La característica clave de este escenario es su área extensa de cobertura libre de obstáculos además de poder admitir vehículos de alta velocidad. Este escenario tendrá limitaciones de ruido o interferencia, utilizando macro puntos de transmisión y recepción (TRP).

Los parámetros de evaluación de este escenario son:

Parámetros	RMa
Frecuencia portadora	Hasta 7 GHz
Altura de BS h_{BS}	35 m
Diseño	Grilla hexagonal, 19 Macro sitios, 3 sectores por site, ISD = 1732 m o 5000 m
Altura de UT h_{UT}	1.5 m
Distribución de UT	Uniforme
Indoor/Outdoor	50% indoor y 50% en automóvil
LoS/NLoS	LoS y NLoS
Distancia mínima BS - UT (2D)	35 m

Tabla 7: parámetros RMa [TR 38.901]

4.1.1.1 Pérdida en el trayecto de propagación para LoS

El modelo de pérdida en el trayecto consta de dos secciones, separadas por una distancia de punto de corte (dBP) donde la atenuación de la pendiente aumenta más allá de la dBP.

Este modelo se utiliza para proporcionar un modelo estadístico de la pérdida en el trayecto de propagación para cuando haya una ruta clara y sin obstáculos entre el transmisor (BS) y el receptor (UT).

Las ecuaciones que definen este modelo se describen en la tabla:

Escenario LOS/NLOS	Pérdida de camino o trayectoria [dB], fc está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena valores predeterminados
RMa LOS	$PL_{RMa-LoS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10km \end{cases}, \text{ ver nota 5}$ $PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}$ $PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10}(d_{3D} / d_{BP})$	$\sigma_{SF} = 4$ $\sigma_{SF} = 6$	$h_{BS} = 35m$ $h_{UT} = 1.5m$ $W = 20m$ $h = 5m$ h = media de altura del edificio W = ancho medio de la calle Rangos de aplicación: $5m \leq h \leq 50m$ $5m \leq W \leq 50m$ $10m \leq h_{BS} \leq 150m$ $1m \leq h_{UT} \leq 10m$
Nota 5: Distancia del punto de ruptura $d_{BP} = 2\pi h_{BS} h_{UT} f_c / c$, donde fc es la frecuencia central en Hz, c = 3.0×10^8 m/s es la velocidad de propagación en el espacio libre y hBS y HUT son las alturas de antena en la BTS y UT, respectivamente. d_{3D} es la distancia de separación tridimensional entre BS y UT en metros. h es la altura promedio del edificio en metros. d_{2D} es la distancia de punto de corte bidimensional (2D) a lo largo de la tierra plana en metros.			

Tabla 8: modelo pérdida de trayectoria RMa LoS [TR 38.901]

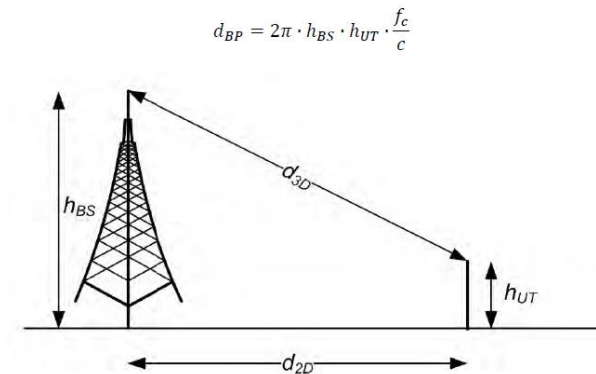


Figura 3.3: Definición de d_{2D} y d_{3D} para terminales UT outdoor.

Figura 22: definición de distancias [TR 38.901]

4.1.1.2 Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS

Las ecuaciones que definen este modelo se describen en la tabla:

Escenario	LOS/NLOS	Pérdida de camino o trayectoria [dB], fc está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena valores predeterminados
RMa	NLOS	$PL_{\text{RMa-NLoS}} = \max(PL_{\text{RMa-LoS}}, PL'_{\text{RMa-NLoS}})$ <p>para $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$</p> $PL'_{\text{RMa-NLoS}} = 161.04 - 7.1\log_{10}(W) + 7.5\log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{\text{BS}})^2)\log_{10}(h_{\text{BS}}) + (43.42 - 3.1\log_{10}(h_{\text{BS}}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20\log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(11.75h_{\text{UT}}))^2 - 4.97)$	$\sigma_{\text{SF}} = 8$	$h_{\text{BS}} = 35\text{m}$ $h_{\text{UT}} = 1.5\text{m}$ $W = 20\text{m}$ $h = 5\text{m}$ h = media de altura del edificio W = ancho medio de la calle Rangos de aplicación: $5\text{m} \leq h \leq 50\text{m}$ $5\text{m} \leq W \leq 50\text{m}$ $10\text{m} \leq h_{\text{BS}} \leq 150\text{m}$ $1\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 10\text{m}$
W es el ancho promedio de las calle en metros.				

Tabla 9: modelo pérdida de trayectoria RMa NLoS [TR 38.901]

La función max (máximo) se usa para resolver un inconveniente en el modelo, que hace que éste dé como resultado una potencia mucho mayor en distancias cercanas para NLoS, que para LoS; garantizando así que el PL de NLoS sea siempre mayor o igual al PL de LoS a la misma distancia.

4.1.1.3 Probabilidad de LoS

La probabilidad de LoS para el escenario RMa se expresa de la siguiente manera:

Escenario	Probabilidad LoS (distancia en metros)
RMa	$Pr_{\text{LoS}} = \begin{cases} 1, & d_{2D\text{-out}} \leq 10\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D\text{-out}} - 10}{1000}\right), & 10\text{m} < d_{2D\text{-out}} \end{cases}$
<u>d2D-out</u> es distancia de separación 2D en metros entre un BS y UT .	

Tabla 10: probabilidad Los RMa [TR 38.901]

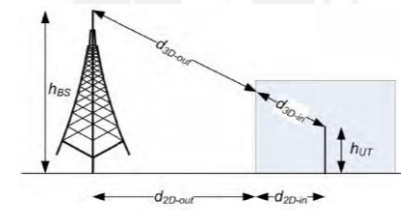


Figura 23: definición de distancias [TR 38.901]

Donde:

$$d_{3D\text{-out}} + d_{3D\text{-in}} = \sqrt{(d_{2D\text{-out}} + d_{2D\text{-in}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2} \quad (6)$$

La razón para que la probabilidad de LoS para RMa, utilice d2D-out en lugar de d2D, es que la probabilidad de línea de vista no considera la penetración de exterior a interior (O2I).

4.1.2 Macrocela Urbana (UMa)

En este escenario la BS está situada sobre la azotea de un edificio y tiene una visibilidad dominante de los usuarios. Para el escenario de macrocela urbana, la mayor parte de la señal llega a los usuarios a través de la difracción y la ruta principal de propagación es sobre los edificios. Este escenario de propagación es similar al escenario UMi y se aplican enfoques similares.

Los escenarios urbanos de macrocela y microcela actualmente coexisten en una misma zona geográfica. Es más, el concepto de redes heterogéneas (HetNet) se basa en mezclar diferentes tipos de tecnologías de radio y hacer uso de pequeñas celdas de baja potencia trabajando en conjunto con las macrocelas, con el objetivo de mejorar la cobertura y la capacidad de la red.

Los parámetros de evaluación de este escenario son:

Parámetros		UMa
Diseño de celda		Grilla hexagonal, 19 micro sitios, 3 sectores por sitio (ISD = 500 m)
Altura de antena B5 h _{BS}		25 m
Ubicación del UT	Outdoor/indoor	Outdoor e indoor
	LoS/NLoS	LoS y NLoS
	Altura h _{UT}	Igual que 3D-UMi según TR 36.873
Radio indoor UT		80%
Movilidad UT(sólo plano horizontal)		3 km/h
Distancia mínima B5 - UT (2D)		35 m
Distribución de UT (horizontal)		Uniforme

Tabla 11: parámetros UMa [TR 38.901]

4.1.2.1 Pérdida en el trayecto de propagación para LoS

Las ecuaciones que definen este modelo se describen a continuación:

Escenario	LOS/NLOS	Pérdida de camino o trayectoria [dB], f_c está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena valores predeterminados
UMa	LOS	$PL_{UMa-LoS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km, \text{ ver nota 1} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{2D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{2D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m$
<p>Nota 1: Distancia del punto de corte $d'_{BP} = 4 h_{BS} h_{UT} / c$, donde f_c es la frecuencia central en Hz, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s es la velocidad de propagación en el espacio libre, y h_{BS} y h_{UT} son las alturas efectivas de antena en la BS y la UT, respectivamente. Las alturas efectivas de antena h_{BS} and h_{UT} e calculan de la siguiente manera: $h_{BS} = h_{BS} - h_E$, $h_{UT} = h_{UT} - h_E$, donde h_{BS} y h_{UT} son las alturas reales de antena, y h_E es la altura efectiva del entorno.</p> <p>Para UMi $h_E = 1.0m$ con una probabilidad igual a $1/(1+C(d_{2D}, h_{UT}))$ con una distribución uniforme discreta (12,15,...,($h_{UT}-1.5$)) en caso contrario. Con $C(d_{2D}, h_{UT})$ dado por:</p> $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} < 13m \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10} \right)^{1.5} g(d_{2D}) & , 13m \leq h_{UT} \leq 23m \end{cases}$ <p>donde</p> $g(d_{2D}) = \begin{cases} 0 & , d_{2D} \leq 18m \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100} \right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2D}}{150} \right) & , 18m < d_{2D} \end{cases}$ <p>Tenga en cuenta que h_E depende de d_{2D} y h_{UT} y, por lo tanto, debe determinarse de forma independiente para cada enlace entre BST y UT. Una BTS puede ser un única BTS o múltiples BTS coticuadas.</p>				

Tabla 12: modelo pérdida de trayectoria UMa LoS [TR 38.901]

En los escenarios UMa, la altura efectiva del entorno debe extenderse para los UT ubicados en los pisos superiores (entiéndase por encima del piso 4). Como existen edificios con diferentes alturas, en el modelo de propagación de dos rayos, el reflejo será desde otros edificios en lugar de desde tierra, para los UT ubicados en pisos superiores. Por lo tanto, la altura efectiva del entorno está relacionada con la altura del UT.

Para los UT con alturas inferiores a 12 m, la ruta de propagación es tal que la reflexión es principalmente desde la tierra (Figura 24, rayos rojos); ya que para la instalación de la antena de la BS, se asume que la altura mínima de los edificios es de 12 m. En este caso, la altura efectiva del entorno se considera de 1 m. Para terminales ubicados por encima del piso 4, la reflexión será principalmente desde otros edificios (Figura 24, rayos azules).

Como la altura del edificio se distribuye uniformemente entre el piso 4 y el piso 8, o entre 12 m y 24 m, y la altura efectiva del entorno debe ser menor que la altura del UT, entonces la altura efectiva del entorno se puede modelar a través de una distribución uniforme entre [12 – h_{UT}].

Para UT indoor puede asociarse con una altura dada por $h_{UT} = 3(nfl - 1) + 1.5$, donde nfl es el número del piso distribuido uniformemente entre 1 y Hfl . Hfl denota la altura del edificio medida en pisos y se distribuye uniformemente entre 4 y 8.

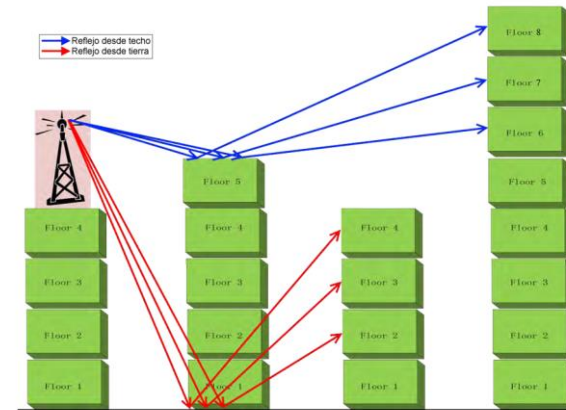


Figura 24: propagación de dos rayos en un entorno urbano [37]

4.1.2.2 Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS

Las ecuaciones que definen este modelo se describen a continuación:

Escenario	Pérdida de camino o trayectoria [dB], fc está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena predeterminados
UMa NLoS	$PL_{UMa-NLoS} = \max(PL_{UMa-LoS}, PL'_{UMa-NLoS})$ para $10m \leq d_{2D} \leq 5km$	$\sigma_{SF} = 6$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m$ Explicaciones: ver nota 3
	$PL'_{UMa-NLoS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$		
	Optional PL = $32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$		
Nota 3: La pérdida de trayectoria de UMa NLoS [TR36.873] con formato simplificado y PLUMa-LoS = Pérdida de trayectoria del escenario exterior UMa LoS.			

Tabla 13: modelo pérdida de trayectoria UMa NLoS [TR 38.901]

Al igual que en el escenario RMa NLoS, la función max garantiza que el PL de NLoS sea siempre mayor o igual al PL de LoS a la misma distancia.

Para el escenario UMa NLoS, el 3GPP TR 38.901 adopta el modelo del TR 36.873, basado en el modelo ABG. Además, se da un modelo opcional basado en el modelo de Close-In (CI), como se muestra en el cuadro de arriba.

4.1.2.3 Probabilidad LoS

Escenario	Probabilidad LoS (distancia en metros)
UMa	$Pr_{LoS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D-out} \leq 18m \\ \left[\frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right) \right] \left(1 + c'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D-out}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{150}\right)\right) & , 18m < d_{2D-out} \end{cases}$ <p>Donde</p> $c'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \leq 13m \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} & , 13m < h_{UT} \leq 23m \end{cases}$

Tabla 14: probabilidad LoS [TR 38.901]

La probabilidad LoS para el escenario UMa, se modela como una suma de dos probabilidades: probabilidades de tipo 1 y tipo 2 de LoS. Esta descomposición es para la simplificación de modelos.

Como se muestra en la figura 25 (a), donde se ve que un UT está en estado LoS de tipo 1 en un piso superior al igual que si otro UT está en el primer piso del mismo edificio.

Por otro lado, se considera que un UT esta en uno de los pisos superiores (tipo 2) y si otro UT esta en el primer piso del mismo edificio, nunca puede alcanzar un estado LoS.

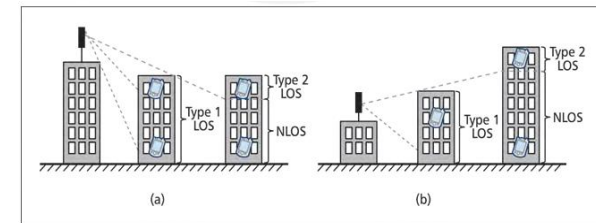


Figura 25: probabilidad tipo 1 y tipo 2: a) escenario UMa; b) escenario UMi [38]

Para el modelado del PL NLoS, la Figura 26 (a) muestra el mecanismo de propagación de radio en un entorno UMa, donde las trayectorias de propagación dominantes viajan a través de difracciones múltiples sobre las azoteas, seguidas de difracción en el borde del edificio. La atenuación por PL aumenta con el ángulo de difracción a medida que una UE pasa de un piso alto a un piso bajo.

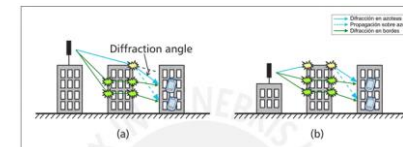


Figura 26: principio de propagación de radio para entornos NLoS: a) escenario UMa; b) escenario UMi [38]

4.1.3 Microcelda urbana (UMi – Street Canyon)

Se desarrolla en áreaa donde la calle está rodeada por edificios en ambos lados creando un entorno tipo cañón donde abundan manzanas con grandes edificios, tipo rascacielos.

Los cañones urbanos afectan a la recepción de las ondas de radio, incluidas las señales de navegación por satélite. El ancho típico de área abierta es de orden de 50 a 100 m.

Los parámetros clave para este escenario son:

Parámetros		UMi - street canyon
Diseño de celda		Grilla hexagonal, 19 micro sie, 3 sectores por sitio (ISD = 200 m)
Altura de antena BS h_{BS}		10 m
Ubicación del UT	Outdoor/indoor	Outdoor e indoor
	LoS/NLoS	LoS y NLoS
	Altura h_{UT}	Igual que 3D-UMi según TR 36.873
Radio indoor UT		80%
Movilidad UT(sólo plano horizontal)		3 km/h
Distancia mínima BS - UT (2D)		10 m
Distribución de UT (horizontal)		Uniforme

Tabla 15: parámetros UMi [TR 38.901]

4.1.3.1 Pérdida en el trayecto de propagación para LoS

Es esencialmente un modelo de CI (pérdida de ruta de distancia de referencia de espacio libre cercano). Las ecuaciones que definen este modelo se describen a continuación:

Escenario	LOS/NLOS	Pérdida de camino o trayectoria [dB], f_c está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena valores predeterminados
UMi - Street Canyon	LoS	$PL_{UMi-LoS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km, \text{ ver nota 1} \end{cases}$ $PL_1 = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9.5\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 10m$
<p>Nota 1: Distancia del punto de corte $d'_{BP} = 4 h'_{BS} h'_{UT} f_c / c$, donde f_c es la frecuencia central en Hz, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s es la velocidad de propagación en el espacio libre, y h'_{BS} y h'_{UT} son las alturas efectivas de antena en la BS y la UT, respectivamente. Las alturas efectivas de antena h'_{BS} and h'_{UT} e calculan de la siguiente manera: $h'_{BS} = h_{BS} - h_E$, $h'_{UT} = h_{UT} - h_E$, donde h_{BS} y h_{UT} son las alturas reales de antena, y h_E es la altura efectiva del entorno.</p> <p>Para UMi $h_E = 1.0m$ con una probabilidad igual a $1/(1+C(d_{2D}, h_{UT}))$ con una distribución uniforme discreta (12,15,...,($h_{UT}-1.5$)) en caso contrario. Con $C(d_{2D}, h_{UT})$ dado por:</p> $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} < 13m \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} g(d_{2D}) & , 13m \leq h_{UT} \leq 23m \end{cases}$ <p>donde</p> $g(d_{2D}) = \begin{cases} 0 & , d_{2D} \leq 18m \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2D}}{150}\right) & , 18m < d_{2D} \end{cases}$ <p>Tenga en cuenta que h_E depende de d_{2D} y h_{UT} y, por lo tanto, debe determinarse de forma independiente para cada enlace entre BST y UT. Una BtS puede ser un única BTS o múltiples BTS coubicadas.</p>				

Tabla 16: modelo pérdida de trayectoria UMi LoS [TR 38.901]

4.1.3.2 Pérdida en el trayecto de propagación para NLoS

Las ecuaciones que definen este modelo se describen a continuación:

Escenario	LOS/NLOS	Pérdida de camino o trayectoria [dB], f_c está en GHz y d está en metros, consulte la nota 6	Sombra desvanecimiento estándar [dB]	Rango de aplicabilidad, altura de la antena valores predeterminados
UMi - Street Canyon	NLOS	$PL_{UMi-NLOS} = \max(PL_{UMi-LOS}, PL'_{UMi-NLOS})$ para $10m \leq d_{2D} \leq 5km$ $PL'_{UMi-NLOS} = 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 7.82$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 10m$ Explicaciones: ver nota 4
	Opcional	$PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 31.9 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 8.2$	

Nota 4: PLUMi-LOS = Pérdida de camino del escenario exterior LOS de UMi-Street Canyon.

Tabla 17: modelo pérdida de trayectoria UMi NLoS [TR 38.901]

Se utiliza un ajuste matemático para corregir las deficiencias del modelo para establecer el modelo de LoS como límite inferior para el modelo NLoS.

En el escenario NLoS, el modelo UMi utiliza el modelo ABG [14], con un término que depende de la frecuencia, que indica que el PL aumenta con la frecuencia; y también tiene un término adicional de corrección de altura para el UT. También se proporciona un modelo opcional basado en CI para PL UMi NLoS.

4.1.3.3. Probabilidad LoS

Escenario	Probabilidad LoS (distancia en metros)
UMa	$P_{rLoS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D-out} \leq 18m \\ \left[\frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D-out}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{150}\right)\right) & , 18m < d_{2D-out} \end{cases}$

Tabla 18: probabilidad LoS [TR 38.901]

El modelo de probabilidad UMi LoS no es una función de la altura del UT como en el modelo de probabilidad UMa LoS.

En un escenario UMi, donde la altura de la antena de la BS es inferior a la altura de los edificios adyacentes, los estados LoS de tipo 1 y tipo 2 se modelan de manera semejante a los del escenario UMa, como una suma de probabilidades de tipo 1 y tipo 2 de LoS. Sin embargo, mediante simulaciones de ray tracing [15], se encontró que la altura del UT probablemente no afecte la probabilidad de LoS en el escenario UMi ya que la condición de LoS de tipo 2 está limitada a situaciones donde la altura del UT es significativamente más grande que la de los edificios que obstaculizan la señal aunque no es lo normal.

El principio de propagación para NLoS en un entorno UMi dice que las rutas de propagación dominantes viajan a través y alrededor de los edificios. El UT también puede recibir una pequeña energía por propagación por encima de las azoteas [16].

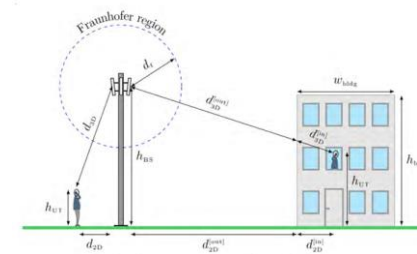


Figura 27: Distancias para escenarios: outdoor (izquierda) y outdoor-indoor (derecha) [16]

Se utiliza un ajuste matemático para corregir las deficiencias del modelo para establecer el modelo de LoS como límite inferior para el modelo NLoS.

5. Planificación de red 5G

5.1 Conceptos básicos de cálculo de presupuesto de enlace (Link Budget)

Este capítulo abordará el cálculo de presupuesto de enlace, definido como el cálculo de la ganancia y la pérdida total en el sistema para conocer el nivel de señal recibida en el receptor (UE).

El nivel de la señal recibida se comparará con la sensibilidad del receptor para comprobar si el estado del canal es correcto (PASA) o incorrecto (NO PASA).

El estado del canal "Pasa" si el nivel de la señal recibida es mejor que la sensibilidad de recepción, de lo contrario "No Pasa". A continuación, la figura muestra algunos valores de ejemplo para ilustrar los diferentes parámetros de entrada utilizados para el cálculo del presupuesto de enlace:

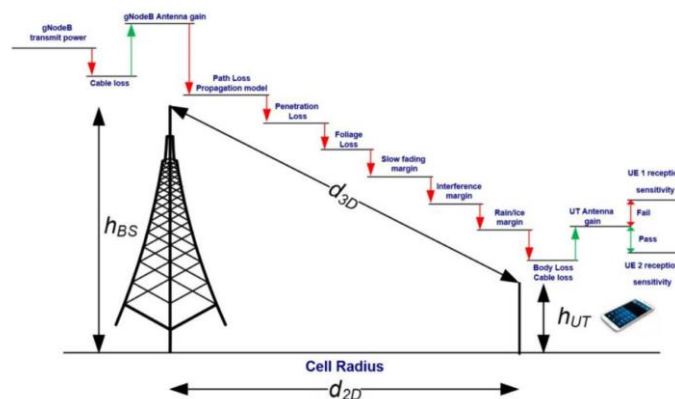


Figura 28: cálculo basado en el estándar [3GPP 38.901]

La siguiente expresión se usa para calcular el nivel de señal recibida del presupuesto del enlace 5G:

$$\begin{aligned}
 RxSL \text{ (Nivel de señal recibida en el receptor (dBm))} &= P_{tx_{gNodeB}} \text{ (dBm)} - \\
 &10 \log_{10}(\text{cantidad de subportadora}) + G_{ant_{gNodeB}} \text{ (dBi)} - L_{cable_{gNodeB}} \text{ (dB)} - L_{trayectoria} \text{ (dB)} - \\
 &L_{penetración} \text{ (dB)} - L_{follaje} \text{ (dB)} - L_{pérdida de bloqueo de cuerpo} \text{ (dB)} - IM \text{ (dB)} - M_{lluvia-hielo} \text{ (dB)} - \\
 &M_{desvanecimiento lento} \text{ (dB)} + G_{ant_{UE}} \text{ (dB)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Por lo general, el enlace limitante es el enlace ascendente y se recomienda calcular el presupuesto del enlace descendente y del enlace ascendente por separado y luego considerar el peor enlace.

Para calcular la pérdida de ruta o trayecto, nos basaremos en los modelos definidos por 3GPP 38.901 descritos en el capítulo anterior. Para este tipo de modelo hay que tener en cuenta los estados LoS/NLoS y la determinación de las pérdidas de trayecto. El modelo de probabilidad LoS considera los UEs a nivel de calle.

Por ejemplo, y si consideramos el modelo UMa para el caso de línea de visión (LOS), la fórmula de pérdida de trayectoria se da de la siguiente manera:

$$\text{Pérdida de trayectoria} = 28.0 + 22 * \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (fc)
 \tag{8}$$

Para calcular la pérdida de trayectoria, necesitamos la información de " d ", que es la distancia entre el transmisor y el receptor (radio de la celda) y la frecuencia central (fc). Si el radio de celda

corresponde al rango máximo de celda, entonces la pérdida de ruta corresponderá a la pérdida de ruta máxima permitida (MAPL).

Una vez que conocemos el valor de la pérdida de ruta o trayecto, es posible calcular el nivel de la señal recibida a comparar con la sensibilidad del receptor.

La sensibilidad del receptor depende de la potencia de ruido térmico (dBm), el factor de ruido (dB) y el umbral de demodulación SINR (dB). La sensibilidad del receptor se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Sensibilidad del receptor (dBm)} = \text{Figura de ruido (dB)} + \text{Ruido térmico (dBm)} + \text{SINR (dB)} \quad (9)$$

$$S_{rx_{dbm}} = NF(dB) + kT10\log_{10}(B_{Weff}) + SINR(dB) \quad (10)$$

El ruido térmico a temperatura ambiente se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Ruido térmico} = -174 + 10\log(\text{"ancho de banda" Hz}) \quad (11)$$

El ancho de banda depende de los bloques de recursos (One Resource Block (RB)). La tecnología 5G contiene 12 subportadoras en un dominio de frecuencia, similar a LTE. En LTE, el ancho de banda del bloque de recursos se fija en 180 KHz, pero en NR no es fijo y depende del espaciado de la subportadora (Δf). En la siguiente tabla podemos observarlo:

Nº subportadoras	Numerología (μ)	$\Delta f=2\mu*15\text{Hz}$ (KHz)	BW por Resource Block (RB) (KHz) [Nº subportadora x Δf]	Min RBs	Max RBs	Canal Min BW (MHz)	Canal Max BW (MHz)
12	0	15(*)	180	24	275	4.32	49.5
	1	30	360			8.64	99
	2	60	720			17.28	198
	3	120	1440			34.56	396
	4	240	2880		138	69.12	397.44

Tabla 19: ancho de banda por RB. (*) a pesar de ser 0, 3GPP le da el valor de 15 [3GPP 38.901]

Cada numerología (μ) define un número mínimo y máximo de bloques de recursos y, conociendo el ancho de banda por bloque de recursos, se puede calcular el ancho de banda mínimo y máximo del canal.

La misma tabla muestra el cálculo para el ancho de banda mínimo y máximo del canal, considerando la banda más baja y la banda más alta. Los anchos de banda que se muestran también incluyen el ancho de banda de la banda de protección.

3GPP especifica una configuración de ancho de banda de transmisión máxima para cada canal de UE además de un espaciado de subportadora. El número de bloque de recursos que se muestra es después de eliminar la banda de protección del ancho de banda del canal y el ancho de banda máximo considerado es 100 MHz [38.101].

Numerología (μ)	SCS (KHz)	Ancho de banda del canal (MHz)	Banda Min de guarda (KHz)	Nº de RB (PRB)	BWmax (KHz) [N° RB x BW]
0	15	50	692.5	270	48600
1	30	100	845	273	98280
2	60	100	1370	135	97200

Tabla 20: ancho de banda de canal y ancho de banda máximo [3GPP 38.901]

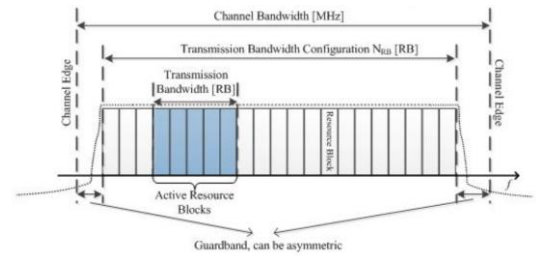


Figura 29. Ancho de banda en función de RB [38.101]

Ejemplo de cómo se calcula el número máximo de RB:

Para $\mu = 0 \rightarrow \Delta f = 15\text{KHz}, BW_{RB} = 180\text{KHz} \rightarrow RB =$

$$\frac{\text{Ancho de banda del canal} - (2 \times \text{banda min.de guarda})}{\text{ancho de banda por Resource Block (RB)}} = \frac{50 \times 10^6 - (2 \times 695.5 \times 10^3)}{180 \times 10^3} = 270 \text{ PRB} \quad (12)$$

La figura de ruido y SINR son valores específicos del proveedor que dependen principalmente del rendimiento del hardware y del rendimiento de decodificación del esquema de codificación de modulación. En la figura siguiente se muestra los valores del SINR establecidos en el requerimiento del 5G heredados del LTE para las diferentes combinaciones de modulación y tasas de codificación.

SISTEMA	MODULACIÓN	CODE RATE	IM (dB)	SINR (dB)
5G UE	QPSK	1/8	2,5	-5,1
		1/5		-2,9
		1/4		-1,7
		1/3		-1
		1/2		2
		2/3		4,3
	16QAM	3/4	3	5,5
		4/5		6,2
		1/2		7,9
		2/3		11,3
	64QAM	3/4	4	12,2
		4/5		12,8
2/3		15,3		
256QAM(*)	3/4	5	17,5	
	4/5		18,6	
				32
				35

Tabla 21: tipos de modulaciones y valores SINR [21][22].
(*)Modulación altas como 256QAM tienen sentido para celdas de reducido tamaño (celdas de interiores de decenas de metros).

Para calcular el radio de celda que corresponde a la sensibilidad de recepción específica, podemos usar la fórmula de balance de enlace (1) y reemplazar el nivel de la señal recibida en el receptor (dBm) con la sensibilidad de recepción:

La sensibilidad de recepción es igual a:

$$\text{Srx (dBm)} = \text{Potencia de ruido térmico (dBm)} + \text{factor de ruido UE (dB)} + \text{SINR umbral demod. (dB)} \quad (13)$$

Reemplazando la fórmula (4) en (1), la pérdida de ruta es igual a:

$$\text{Pérdida de ruta completa o trayecto (dB)} = P_{\text{Tx}_{\text{eNodeB}}} \text{ (dBm)} - 10 \log_{10}(\text{cantidad de subportadora}) + G_{\text{ant}_{\text{eNodeB}}} \text{ (dBi)} - L_{\text{cable}_{\text{eNodeB}}} \text{ (dB)} - L_{\text{penetración}} \text{ (dB)} - L_{\text{foliaje}} \text{ (dB)} - L_{\text{pérdida de bloqueo de cuerpo}} \text{ (dB)} - \text{IM (dB)} - M_{\text{lluvia-hielo}} \text{ (dB)} - M_{\text{desvanecimiento lento}} \text{ (dB)} + G_{\text{ant}_{\text{UE}}} \text{ (dB)} - \text{Potencia}_{\text{ruido térmico}} \text{ (dBm)} - \text{NF}_{\text{UE}} \text{ (dB)} - \text{SINR}_{\text{umbral de demodulación}} \text{ (dB)} \quad (14)$$

Una vez que se calcula la pérdida de trayectoria y conociendo la frecuencia central, podemos concluir el radio de la celda utilizando la fórmula de pérdida de trayectoria. La tecnología 5G utiliza modelos de propagación 3D definidos en 3GPP 36.873:

$$\text{Pérdida de trayectoria (PL)} = 28.0 + 22 \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (fc) \quad (15)$$

Finalmente obtenemos el radio de celda "d" de la fórmula (5) por la siguiente fórmula:

$$\text{Distancia (d)} = 10^{\frac{\text{Potencia} - (\text{PL} - 28 - 20 * \text{Log}_{10} (fc))}{22}} \quad (16)$$

Hasta ahora queda claro que el presupuesto de enlace nos permite calcular el radio de celda (R) en función de una sensibilidad de receptor determinada o calcular el nivel de señal recibida (RSL) para un radio de celda dado y compararlo con la sensibilidad de recepción para verificar el estado del canal: si Pasa o si No Pasa.

La sensibilidad de recepción se basa principalmente en los requisitos de capacidad (rendimiento), ya que el valor SINR está directamente relacionado con el rendimiento que queremos lograr en el borde de la celda.

Al conocer el radio de la celda (R), podemos obtener la cobertura que cubre una estación base usando la siguiente fórmula:

$$\text{Área de cobertura} = \pi R^2 \quad (17)$$

Finalmente, el número de estaciones base 5G necesarios se puede calcular de la siguiente manera:

$$\# \text{ 5G gNodeB} = \frac{\text{Área de superficie total del conglomerado en Km cuadrados}}{\text{Área de cobertura de un solo gNB}} \quad (18)$$

Conocer el número de estaciones base 5G necesarias para un clúster dado es muy necesario ya que crear el proyecto en la herramienta de planificación requiere tiempo. Conocer la cantidad de gNodeB ayudará al proveedor y al operador a estimar el costo y el esfuerzo. El cálculo del presupuesto de enlace nos permite también estimar la capacidad alcanzada en función de diferentes requisitos de calidad (SINR).

Como conclusión de este capítulo, debemos tener en cuenta que para calcular una red de telefonía móvil basándonos "solo" en el cálculo del presupuesto de enlace sin ayuda de una herramienta de planificación no tiene sentido, ya que dicho calculo, no nos proporciona otro tipo de datos fundamentales para una correcta planificación, como sería la ubicación de los emplazamientos (latitud y longitud), orografía del terreno etc. Pero si que nos servirá como datos de partida para la herramienta elegida ya que los principales resultados del presupuesto de enlace son:

- Radio de celda
- Número de estación base 5G requerida
- Capacidad y rendimiento logrados (en el borde de la celda) (No abordable en este TFM)

Pero donde reside la clave para ambos cálculos (presupuesto de enlace o herramienta de planificación) es en el modelo de propagación utilizado. Incluso utilizando el mismo modelo de propagación en la herramienta de planificación y presupuesto de enlaces, obtendremos un valor de radio de la celda diferente ya que la herramienta de planificación utiliza cálculos complejos basados en el modelo del terreno, el desorden y la información de los edificios y considera los factores de propagación como la reflexión, la difracción y el cálculo de detalles para la atenuación causada por diferentes obstáculos (edificios, árboles,..).

5.2 Cálculo de Cobertura 5G gNodeB

5.2.1 Cálculo Presupuesto UpLink y DownLink

Definimos los parámetros del nodo 5G y del usuario (UE) tanto para enlace ascendente como para enlace descendente para comprobar si el canal 'PASA' o en su defecto 'NO PASA', basándonos en una macrocelda donde el UE se encuentra a 250 metros de la BTS y además la BTS está situada por encima de los edificios que la rodean aplicando las expresiones anteriormente detalladas:

DATOS DE PARTIDA		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Distancia entre Tx y Rx	250	m
Frecuencia central para Tx	3500	MHz
Número de PRB	1	
Numerología - Configuración del espaciado de subportadoras (μ)	15	KHz
Cantidad de subportadoras	12	
Ancho de banda de canal	50MHz	

Tabla 22: dato de partida [elaboración propia]

Se usa el modelo de pérdida de trayectoria UMa, ya que las BTS objetivo de estudio en este TFM se encuentran en suelo urbano e instaladas en cubiertas siendo el tipo de cobertura Exterior.

El cálculo se ha realizado tanto para ruta LoS y como para ruta NLoS, escogiendo el máximo de los dos tal como cita 3GPP y a partir de ese valor calculamos el valor de cobertura y el número de BTS necesarias en función de los kilómetros cuadrados (km²) que deseemos cubrir para finalmente aplicarlos en el capítulo siguiente.

En el apartado de pérdidas se han tenido en cuenta los valores de las siguientes tablas cuyos valores son recomendados para el 5G:

Pérdida corporal (dB)		
Banda de frecuencia (GHz)	3.5	28
Pérdida de cuerpo	3 - 5	8 - 40
Pérdida corporal típica	3	15

Tabla 23: pérdida corporal [ITU-R M.2292-0]

Desviación estándar de desvanecimiento lento (considerando el 95% de cobertura del área)					
Tipo:	Urbano denso	Urbano	Suburbano	Rural	LoS
O2I (exterior a interior)	9	8	7	6	5
O2O (exterior a exterior)	8	7	6	5	4

Tabla 24: desviación estándar de desvanecimiento [3GPP 38.901]

Pérdida de follaje (dB)		
Banda de frecuencia (GHz)	3.5	28
Árbol escaso	7,5	8
Árbol denso	8,5	15
2 árboles	11	19
3 árboles	19,5	24
Pérdida típica de follaje	11	17

Tabla 25: pérdida de follaje [IT ITU-R P.833-9]

Margen de lluvia / hielo (dB)		
Banda de frecuencia (GHz)	3.5	28
Pérdida de cuerpo	0	3

Tabla 26: margen de lluvia [UIT-R P. 530-16]

Margen de interferencia (dB)		
Banda de frecuencia (GHz)	3.5	28
Margen de interferencia típico DL	6	1
Margen de interferencia típico UL	2	0,5

Tabla 27: margen de interferencia [23]

Un dato importante, en el que tenemos que fijarnos, es en el valor del umbral demodulación SINR, en este caso hemos optado por un valor de -4 dB, valor aleatorio muy próximo a los valores de la modulación QPSK (ver tabla 21) y en los siguientes apartados veremos la importancia de dicho parámetro.

Finalmente una vez fijado los parámetros más significativos en cuanto al cálculo de presupuesto, nos quedaría comparar el nivel de la señal recibida con la sensibilidad del receptor para comprobar si el estado del canal es correcto o incorrecto.

➤ Dirección de enlace: UpLink

CONFIGURACIÓN UE		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Potencia de TX	23	dBm
Pérdida de cable	0	dB
Ganancia de la antena	0	dB
Altura de la antena (h _{ue})	1,5	m
Potencia de Transmisión por subportadora	12.21	dBm
CONFIGURACIÓN gNodeB		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Potencia TX	48	dBm
Figura Ruido	2	dB
Objetivo SINR	-4	dB
Pérdida de cable	2	dB
Ganancia de la antena 5G (AAU5613)	24	dB
Altura de la antena	23	m
Ruido Térmico	-121.45	dBm
Sensibilidad Receptor	-124.55	dBm
CÁLCULO DE PÉRDIDA DE TRAYECTORIA COBERTURA EXTERIOR		
Modelo de propagación	3D-UMa	
Pérdida de ruta LoS = 28 + 22log10(d) + 20log10(fc)		
Pérdida de ruta NLoS = 13,54+39,08log10(d) + 20log10(fc) - 0,6(hUT-1,5)		
Pérdida de ruta LoS	91.64	dB
Pérdida de ruta NLoS	118.13	dB
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Pérdida corporal típica	3	dB
Margen de desvanecimiento lento	7	dB
Pérdida de follaje típica	11	dB
Margen de lluvia / hielo	0	dB
Margen de interferencia típica UL	2	dB
Pérdida de penetración	22	dB
Pérdida de trayectoria [Max (NLoS, LoS)]	118.13	dB
Pérdida ruta completa o trayecto	137.66	dB
Presupuesto de enlace (Link Budget)	-103.92	dBm
ESTADO DEL CANAL	PASA	

Tabla 28: estado del canal UpLink [elaboración propia]

Presupuesto de enlace (Link Budget) > Sensibilidad Receptor →PASA

En ambas situaciones el estado del canal 'PASA', y a partir de aquí ya podemos calcular el área o cobertura que podrán ofrecer cada una de las BTS de nuestro proyecto, siendo la base de los próximos cálculos, el enlace limitante, que en este caso es el ascendente y cuyos datos nos servirán como base en la herramienta de diseño.

➤ Dirección de enlace: DownLink

CONFIGURACIÓN gNODEB		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Potencia de Transmisión	48	dBm
Pérdida de cable	0	dB
Ganancia de la antena 5G (AAU5613)	24	dB
Altura de la antena (h _{ue})	23	m
Potencia de Transmisión por subportadora	37,21	dBm
CONFIGURACIÓN UT		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Figura Ruido	6	dB
Objetivo SINR	2	dB
Pérdida del cable	0	dB
Ganancia de la antena	0	dB
Altura de la antena	1,5	m
Ruido Térmico	-121.45	dBm
Sensibilidad Receptor	-113.45	dBm
CÁLCULO DE PÉRDIDA DE TRAYECTORIA COBERTURA EXTERIOR		
Modelo de propagación	3D-UMa	
Pérdida de ruta LoS = 28 + 22log10(d) + 20log10(fc)		
Pérdida de ruta NLoS = 13,54+39,08log10(d) + 20log10(fc) - 0,6(hUT-1,5)		
Pérdida de ruta LoS	91.64	dB
Pérdida de ruta NLoS	118.13	dB
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Pérdida corporal típica	3	dB
Margen de desvanecimiento lento	7	dB
Pérdida de follaje típica	11	dB
Margen de lluvia / hielo	0	dB
Margen de interferencia típica UL	6	dB
Pérdida de penetración	22	dB
Pérdida de trayectoria [Max (NLoS, LoS)]	118.13	dB
Pérdida ruta completa o trayecto	125.66	dB
Presupuesto de enlace (Link Budget)	-76.24	dBm
ESTADO DEL CANAL	PASA	

Tabla 29: estado del canal DownLink [elaboración propia]

Presupuesto de enlace (Link Budget) > Sensibilidad Receptor →PASA

5.2.2 Cálculo Cobertura

Una vez sabemos que el presupuesto de enlace 'PASA' ya podemos calcular el radio de nuestras celdas y por defecto el área que cubrirá. Nos basaremos en la dirección de enlace UPLink tal y como hemos descrito en el apartado 5.1 ya que es el más restrictivo debido a que amplificar la señal que emite el equipo móvil en la estación base sería más recomendable que hacerlo en el UE.

A partir del valor máximo de pérdida de trayecto (ruta NLoS) calculado en el apartado anterior, despejamos 'd' pero antes de ello, debemos calcular el valor de pérdida de trayecto introduciendo la sensibilidad de recepción en la fórmula de balance de enlace (ver expresión (14)).

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de ruta completa o trayecto (dB)} \\ &= 48 \text{ dBm} - 10\log_{10}(12) + 24 \text{ dbi} - 2 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 11 \text{ B} - 3 \text{ dB} - 2 \text{ dB} - 0 \text{ dB} \\ &\quad - 7 \text{ dB} + 0 \text{ dB} - (-123,45 \text{ dBm}) = 137,66 \text{ dB} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Pérdida de ruta NLoS (dB)} = 13,54 + 39,08\log_{10}(d) + 20\log_{10}(fc) - 0,6(h_{UT} - 1,5) \quad (20)$$

$$R = 10^{\frac{\text{Pérdida de ruta NLoS} - 13,54 - 20\log_{10}(fc) - 0,6(h_{UT} - 1,5)}{39,08}} = 10^{\frac{137,66 - 13,54 - 20\log_{10}(3,5)}{39,08}} = 790\text{m} \quad (21)$$

Y el valor del área máximo a cubrir por BTS (cobertura) será:

$$A = \pi R^2 = \pi(790)^2 = 1959474,97\text{m}^2 = 1,95947\text{km}^2 \quad (22)$$

En cuanto al cálculo del número de nodos 5G necesario, necesitamos saber el área total en kilómetros cuadrados que queremos cubrir para poder establecer un número de BTS apropiado.

El TFM se ha desarrollado en base a la localidad de Puerto del Rosario, Fuerteventura (Islas Canarias) y como se aprecia en la imagen de abajo, la zona a cubrir son 17,26km².

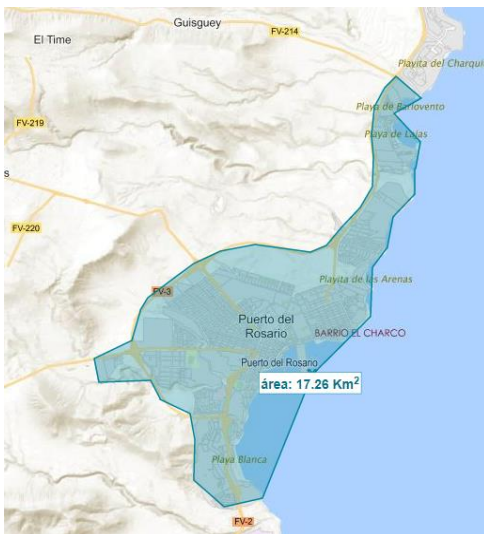


Figura 30: superficie a cubrir [39]

El número de nodos para cubrir la localidad de Puerto del Rosario son:

$$\# 5G \text{ gNodeB} = \frac{17,26}{1,95947} = 8,8 \approx 9^* \quad (23)$$

*Nota: este dato lo tendremos en cuenta en la Herramienta de Planificación Xirio Online

Finalmente nos queda por calcular el valor del downtilt o tilt (ángulo da antena en relación con el eje) adecuado en función del radio 'R' y del diagrama de radiación del modelo de antena utilizado (Huawei AAU5613). El tilt se utiliza cuando queremos reducir las interferencias y / o cobertura, de manera que cada célula sólo cumplirá con su área proyectada.

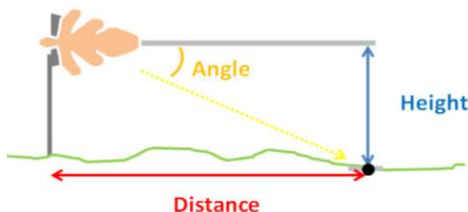


Figura 31: cálculo de tilt [40]

Asumimos que la altura las antenas transmisoras son de 23 metros sobre el suelo, tal como hemos aplicado en los cálculos, lo que implica encontrar el downtilt adecuado a la caída de 3 dB en el diagrama de radiación.

Primero encontramos el ángulo por el que la antena apunta al límite de la celda aplicando trigonometría.

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h_{BTS}}{R_{celda}}\right) = \arctg\left(\frac{23}{790}\right) = 1,66^\circ \quad (24)$$

Ahora buscamos en el diagrama de radiación vertical de la antena elegida el ángulo a -3dB y sumamos el valor al resultado a la anterior.

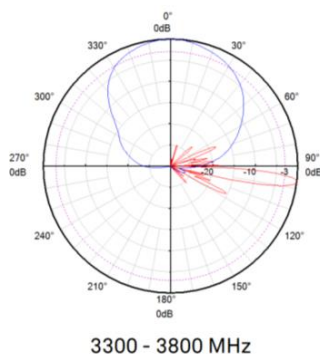


Figura 32: diagrama de radiación banda 3500 MHz [ver anexo]

- Las rectas nos dice la dirección (azimut) – como los números 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 y 330 en las cifras anteriores.
- Y las 'curvas' o 'círculos' nos indica la ganancia en esa dirección (por ejemplo, el círculo mayor te dice donde la antena logra una ganancia de 10 dB y el círculo menor -25dB).

Según las especificaciones de este modelo para la banda de 3500 MHz, $\alpha_{3dB} \approx 4,75^\circ$.

Por tanto.

$$\alpha_{downtilt} = \alpha + \alpha_{-3dB} = 1,66^\circ + 4,75^\circ = 6,41^\circ \approx 6^\circ \quad (25)$$

**Nota: este valor puede variar en función de la situación real de los emplazamientos.*

Volviendo atrás, concretamente a la fórmula de pérdida de ruta (20), llegamos a la conclusión de que el factor principal que controla el valor de la pérdida de ruta es el umbral de demodulación SINR (dB), lo que significa que para valores de SINR más altos, mejor modulación, pérdida de ruta menor y por lo tanto, el radio es más pequeño. Lo cual nos lleva a pensar que realmente se cumple uno de los objetivos del 5G, formar una red de comunicaciones 5G más densa de BTS, funcionando en conjunción con las redes 4G existente, usando una gama de macroceldas, celdas pequeñas (small cells) y sistemas dedicados en edificios. Donde Las celdas pequeñas son mini estaciones base diseñadas para coberturas muy localizadas, típicamente de 10 metros a algunos cientos de metros, que proveen de cobertura a una gran red macro, siendo estas esenciales para las redes 5G [41].

6. Planificación Radioeléctrica

La herramienta de simulación Xirio Online permite realizar de forma rápida y económica simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo en entornos rurales y urbanos, utilizando cartografía de alta resolución que distingue cinco tipos de estudios:

1. perfil,
2. cobertura,
3. cobertura multitransmisor,
4. red de transporte y
5. altura efectiva.

Nuestro estudio se basará en la planificación radioeléctrica de cobertura multitransmisor.



Figura 33. Ventana principal de Xirio Online [2]

Las distintas tecnologías y servicios radioeléctricos requieren una metodología específica en cada caso y unos procedimientos de planificación particulares.

Los procesos de planificación pueden desglosarse en planificación de redes de acceso [24] y planificación de redes de transporte [25].

6.1 Xirio Online

Las herramientas de planificación radioeléctrica esta desarrollado por la empresa APTICA y presenta dos módulos de trabajo independientes:

- **Planningtool:** como herramienta de planificación radioeléctrica genérica que puede aplicarse al diseño de la totalidad de tecnologías inalámbricas: comunicaciones móviles (GSM, DCS, UMTS, LTE, 5G...), radiodifusión (TV, DVB-T, FM, DAB, DVB-H,...), sistemas de comunicaciones móviles profesionales (PMR, TETRA,...), radioenlaces (PDH, SDH,...), acceso a banda ancha (LMDS, WiMAX, WiFi,...).

Las posibles aplicaciones son ilimitadas siempre y cuando se disponga de los parámetros específicos de cada tecnología y los algoritmos y métodos de cálculo apropiados de aplicación en cada una de ellas. Permite el acceso a la aplicación así como realizar cálculos a baja resolución de forma completamente gratuita.

Cuando desea realizar los cálculos con una calidad profesional (alta resolución), el usuario paga y se le proporciona un crédito, lo que le proporciona derecho a dichos cálculos y, además, a compartir los resultados con terceros usuarios o descargarlos a su máquina local.

- **Shareplace:** herramienta que permite a los usuarios publicar los resultados de sus estudios y proporcionar a otros usuarios acceso a los mismos. Es ideal para compartir información de proyectos con distintas áreas de la organización, clientes, proveedores, etc.

El usuario de SharePlace dispone de un acceso limitado a aquellos resultados que han sido publicados para él. Desde la aplicación es posible visualizar la cobertura radioeléctrica impuesta por las estaciones de forma individual o conjunta, chequear los valores de señal en cada punto del área de servicio, o utilizar herramientas de utilidad como búsqueda de dirección postal, cálculo de distancias, cálculo de perfiles orográficos, inserción de puntos de interés, etc.

Xirio Online incluye los métodos de cálculo más habituales y reconocidos a nivel internacional, especialmente para entorno urbano (Rec. UIT-R P.530, Rec. UIT-R P.526, Rec. UIT-R P.1411, TR 38.901, Deygout, LOS, Rec. UIT-R P.1546, COST 231, Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, etc.), además de proponer al usuario los parámetros por defecto más adecuados en cada caso, para que la simulación de redes de cualquier tecnología resulte extremadamente sencilla, incluso para usuarios no expertos en radiofrecuencia.

Respecto a la cartografía, la aplicación utiliza el conocido visor Google Maps haciendo posible trabajar en cualquier parte del planeta. Además incorpora modelos del terreno 3D, que simulan la orografía del escenario donde se desplegarán las redes. La calidad y resolución de los datos permiten disponer de las mejores bases para realizar simulaciones de cobertura radioeléctrica con tecnologías inalámbricas. Las fuentes de los datos tienen un origen tanto vectorial como de tecnología LIDAR (sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado). Esto permite alcanzar una alta precisión en las tres dimensiones (X, Y, Z) y modelar un escenario más parecido a la realidad, identificando elementos como torres, tejados a dos vertientes, patios interiores, etc.

La aplicación incluye dos modelos cartográficos 3D, ambos con una resolución que va de 5m/pixel y disponibles para toda la zona occidental de Europa:

- **Modelo digital del terreno (MDT):** Se trata de una capa de elevación donde los elementos como edificios, carreteras y vegetación han sido eliminados digitalmente (ver figura 34).

Puede ser usada para realizar los cálculos más precisos en redes de difusión, móviles o acceso a banda ancha. Esta capa proporciona la más alta resolución y precisión disponibles en el mercado para grandes áreas en Europa.

- **Modelo de superficie (MDE):** Este modelo contiene todos los elementos de elevación como edificios, vegetación, torres de alta tensión, infraestructuras, etc. Proporciona unas inmejorables condiciones para analizar la obstrucción en radio enlaces del servicio fijo en bandas de microondas así como de otras tecnologías de alta frecuencia (ver figura 35).

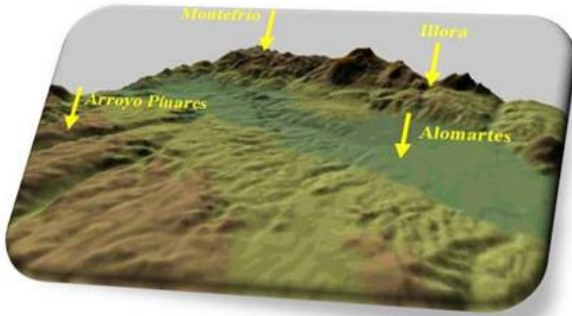


Figura 34: Modelo digital del terreno (MDT) [2]

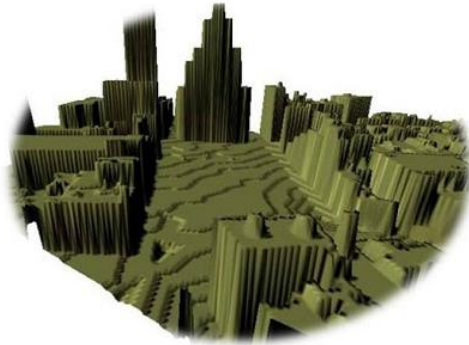


Figura 35: Modelo de superficie (MDE) [2]

Se espera que, como mínimo, las herramientas de planificación nos proporcionen los siguientes datos:

- Un plano de las ubicaciones de las estaciones base.
- Un plan de asignación de frecuencias.
- Información de tráfico.
- Un mapa de cobertura y análisis de la prestación del servicio probable.

XIRIO Online cuenta con diferentes módulos de trabajo y a continuación haremos una descripción de los más importantes:

Módulo de importación de datos.

Permite importar diferentes tipos de información en la herramienta de planificación, como por ejemplo, información de la ubicación de carreteras, trenes, ríos etc. direcciones, nombres de ciudades, códigos y nombres de provincia se pueden cargar y se muestran cuando sea necesario, es decir, las entradas basadas en el modelo digital del terreno (MDT).

Podemos obtener información a partir de mapas de papel, mapas digitales, por satélite etc. Los datos MDT se cargan en forma de trama y pueden usar cualquier tamaño de píxeles. La resolución puede ir desde los 10 metros hasta los 200.

Módulo de perfiles.

Proporciona los perfiles del terreno para estudios de enlaces de microondas o simplemente para examinar el perfil entre dos puntos para el análisis de modelos (punto a punto, BTS a punto o BTS a BTS). La cantidad de obstáculos a lo largo de cualquier camino puede determinarse a partir de datos del terreno almacenados, además de estimar la pérdida de difracción. Nos da una visión gráfica de los cálculos.

Módulo de modelización y análisis.

Con este módulo evaluamos los diferentes modelos de propagación. Se puede importar datos de medidas empíricas sobre el terreno o seleccionar un modelo concreto que evalúe las pérdidas de propagación numéricamente. La diferencia entre los distintos tipos de datos puede provocar un error de hasta 6 dB (valor RMS). Permite evaluar diferentes parámetros que son importantes en los modelos de propagación como son: el perfil del terreno entre el transmisor y el receptor. La altura efectiva de la antena, aplicable al transmisor y al receptor, diagramas de radiación de diferentes antenas. Dando la posibilidad de calcular los efectos de estos elementos en los datos medidos, asegurando

que la verdadera pérdida de trayecto entre las antenas isotropas pueda ser estimada para todos los puntos de medición.

Módulo de predicción de propagación.

La herramienta posee una amplia gama de modelos de propagación y en función del seleccionado podemos calcular la cobertura de las estaciones bases elegidas. Las predicciones se pueden realizar para las áreas que van desde diámetros de 1 km a más de 100 km, utilizando cualquier resolución de la cartografía adecuada. Las predicciones pueden llevarse a cabo en una célula individual o para un clúster. Es posible realizar predicciones seleccionando más de un modelo de predicción para una BTS, u obtener una serie de predicciones para cualquier sitio individual utilizando diferentes alturas de antena, los patrones de radiación y downtilts, o diferentes potencias de transmisión.

Módulo de análisis de cobertura.

Permite calcular zonas de cobertura en múltiples ubicaciones. Si se presentan deficiencias en la cobertura de ciertas estaciones base, este módulo nos permite realizar cambios en los parámetros introducidos referentes a la altura de antena y el patrón, la orientación, tilts y potencia del transmisor. De esta manera, es posible optimizar interactivamente la cobertura. También es posible mostrar los límites de igual potencia, donde es probable que tenga lugar el traspaso entre una célula y otra.

Podemos obtener la estación con más probabilidades de dar el mejor servicio (el mejor servidor) para un móvil en un área determinada. También puede predecir un segundo mejor servidor. Estas predicciones son muy útiles porque indican la cantidad de tráfico que podría ser manejado por las estaciones bases específicas y esto ayuda en el dimensionado de la red.

Módulo de análisis de interferencia.

Analizar las interferencias es un paso fundamental en el diseño de sistemas de radiotelefonía celular, ya que están diseñados para ser limitados por la interferencia más que por el ruido. Los módulos de predicción de propagación necesitan generar predicciones precisas en distancias cortas e intermedias para los cálculos de cobertura, pero es igualmente importante contar con predicciones de largo alcance para la estimación de la interferencia. Con este módulo podemos calcular, analizar y mostrar la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente de enlace descendente en las regiones especificadas por el usuario. El análisis se puede realizar para portadoras de tráfico, portadoras de control o para todas.

Módulo de dimensionamiento de tráfico.

Este módulo permite la creación de información de la trama de tráfico utilizando diversos métodos. Puede importar tráfico de datos midiendo en la red y a partir de ello, permite crear mapas de densidad de tráfico Erlang (erlang / km²). Permite realizar tablas del número necesario de canales por célula para un grado determinado de servicio (GOS) utilizando el modelo Erlang-B, el modelo Erlang-C o modelos de circuitos dedicados además de identificar aquellas celdas que no cumplan con el grado requerido de servicio.

6.2 Coberturas individuales

En este apartado explicaremos el funcionamiento de la herramienta, a medida que hacemos el estudio.

Para explicar el funcionamiento de la herramienta nos basaremos en el estudio de una cobertura multitransmisor paso a paso en una zona urbana en la localidad de Puerto del

Rosario, tema principal de este TFM, donde actualmente existen emplazamientos de telefonía móvil de varios operadores, pero nos centraremos en los nodos del operador Vodafone (VDF) tal y como se muestra en la siguiente imagen, ya que es el operador que posee la red de comunicaciones más pobre en comparación con los otros y por consiguiente presenta un déficit de cobertura que intentaremos mejorar en base a los cálculos del capítulo anterior.



Figura 36: Situación nodos existentes de Vodafone [42]

Una vez elegida la zona en la que queramos proporcionar cobertura 5G, colocaremos las antenas en cada uno de los nodos existentes con la misma configuración de orientaciones.

Cada uno de los nodos posee un código de localización que le sirve a la operadora para conocer su ubicación, dirección, tecnologías existentes y demás configuraciones.

A continuación mostraremos la información de cada uno de ellos:



Figura 37: localización e información nodos Vodafone [42]

La información general de cada nodo queda resumida en la siguiente tabla, dicha información se ha obtenido de los planos M2 (infraestructura) del operador objeto de estudio y que nos servirán de base en la herramienta.

Cod de localización	Coordenadas		Dirección	Altura Antena (m)	Altura Edificio (m)	Orientaciones (grados)			Tilt (grados)
	Latitud	Longitud				Sector 1	Sector 2	Sector 3	
51086	28N3016,46	13W5218,66	CL Andalucía, 25	14	9	110	215	320	6
151195	28N3009,32	15W5220,40	CL León y Castillo, 156	17	10.55	20	120	230	6
2239	28N2959,75	13W5149,01	CL León y Castillo, 25	23	16.25	40	195	300	6
76301	28N2940,47	13W5153,40	CL Guadiana, 24	20	14.55	60	210	340	6
17135	28N3005,98	13W510197	CL Comandante Diaz Trayter, 76	20	11	10	145	225	6

Tabla 30: datos localizaciones [elaboración propia]

Un estudio es la unidad básica de trabajo de XIRIO, formado por distintos elementos radioeléctricos, siendo la unidad mínima sobre la cual se puede realizar un cálculo. El estudio que se va a realizar es de tipo Cobertura Multitransmisor, que es un estudio basado en la combinación de varios estudios de cobertura en el que el resultado es una mancha de colores que representa en cada punto la mejor señal entre las señales de las coberturas individuales, además de resultados de mejor servidor y solapamiento. [26]

En los estudios de Cobertura individuales que se van a combinar, intervienen un transmisor y un receptor, donde este último se va desplazando por todo el área de cálculo. El resultado final de cada estudio de cobertura es una mancha de colores que representa la cobertura radioeléctrica del transmisor, indicando las zonas en las que el nivel de señal en el receptor se encuentra por encima de su umbral de recepción. [26]

Una vez decidido el tipo de cobertura, comenzamos con su creación en XIRIO. Partiremos de la creación de varios estudios de cobertura individual por nodo para luego combinarlos en un estudio de cobertura multitransmisor haciendo uso del modo asistente (ver Figura 38). Se eligen las opciones: Servicio Móvil y un servicio de 5G. A continuación damos nombre a la cobertura, seleccionamos banda de trabajo y especificamos las características de los sectores que va a tener nuestro nodo (ver Figura 39).



Figura 38: Crear nuevo estudio [2]

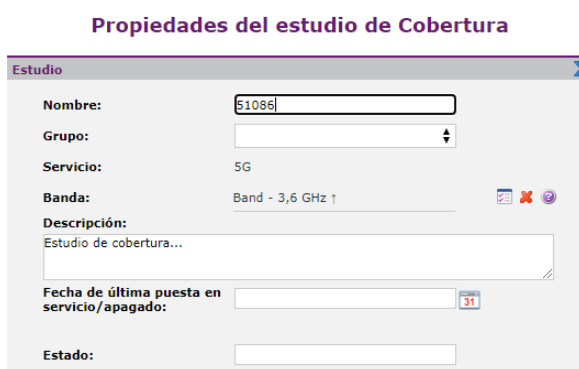


Figura 39: Propiedades del estudio de Cobertura [2]

Ahora damos nombre al sector que tendrá la antena transmisora, además de definir su situación geográfica. Hay diversas formas de definir esta ubicación, en nuestro caso, parece más preciso utilizar las coordenadas de latitud y longitud exactas, aunque si conocemos con exactitud la ubicación de los mismos, XIRIO nos da la opción de seleccionar el punto directamente del mapa mediante el botón de la flecha azul (ver en la Figura 40).

Propiedades del sector

Sector

Nombre:

Emplazamiento

Emplazamiento:

Coordenadas

Latitud:

Longitud:

Figura 40: Coordenadas [2]

Se elige la opción de sectorizar el estudio, como vemos en la Figura 41. Las antenas en comunicaciones móviles obtienen un gran rendimiento dividiendo la cobertura de la antena en tres sectores de 120° cada uno, evitando así las interferencias [27]. En la 42 se puede ver la opción de modificar los parámetros de la antena transmisora. En este caso hemos creado una nueva antena para 5G con sus diagramas de radiación, tanto el horizontal como el vertical, en este último hemos representado un beamforming con un total de 9 haces lo que nos tiene que servir para ganar en cobertura.

Sectorizar el estudio de cobertura

Opciones de sectorización

Número de sectores:

Azimut del primer sector: ° [Recalcular](#)

Antena sectorial:

Sectores

Nombre	Tx	Azimut	Inclinación
51086_S1	51086_S1	320	0
51086_S2	51086_S2	110	0
51086_S3	51086_S3	215	0

Áreas

Figura 41: Sectorización [2]

Propiedades de la Antena

Antena

Nombre:

Tipo de antena:

Peso: Kg

Dimensión mayor: m

Propiedades del Diagrama de Radiación

Propiedades

Tipo de haz:

Polarización:

Ganancia: dBi

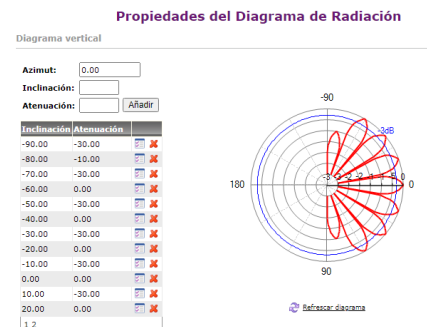
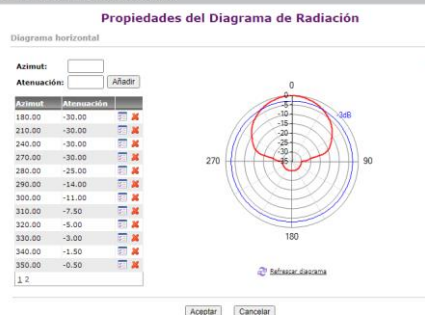


Figura 42: Propiedades Antena [2]

En el siguiente paso (Figura 43) se pueden personalizar algunos parámetros del sector. Introducimos las alturas tanto de la cubierta como la altura de nuestras antenas, escogemos polarización vertical y potencia de transmisión de 48 dBm aparte de introducir las pérdidas de cable (feeder).

Configuración de parámetros del sector

Parámetros del sector

Los parámetros de radio del transmisor se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

Tipo sistema: Estándar

Altura antena: 12.5 m

Usar altura de edificio: Capa de elevación (MDE)

Altura edificio: 9 m

Frecuencias de transmisión

Polarización: Vertical

Feeder: [Empty field]

Longitud del feeder: 0 m

Pérdidas del feeder: 2 dB

Pérdidas pasivos: 0 dB

Potencia: 48 dBm

Figura 43: Parámetros de radio [2]

Ahora nos encontramos con los parámetros 5G, (ver Figura 44). Primero elegimos el tipo de planificador, para ello entramos en la opción 'Modificar Planificador', y elegimos la primera opción: 'curvas de eficiencia espectral definidas por el terminal de usuario' (ver Figura 45). Podemos optar por utilizar tres tipos de planificadores: Round Robin, Maximum Rate y Proportional Fair. En este caso elegimos la opción de Proportional Fair (PF) con una ganancia típica del PF scheduler de 6 dB que viene marcada por defecto en la herramienta y cuyo diseño se basa en sacar provecho de la diversidad multiusuario y al mismo tiempo mantener niveles comparables entre los throughputs de los distintos usuarios.

Volviendo a la figura 44, en cuanto a los parámetros 5G, no realizaremos ningún cambio, ya que para la simulación de cobertura multitransmisor la herramienta no los tendrá en cuenta.

Parámetros 5G

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplican al realizar un análisis global de capacidad/cobertura de toda la red.

Planificador

Configuración de slots: No TOD

Numerología (α): 0

Considerar SIC en la estación

Umbral borde de célula: 0 dB

Parámetros de tráfico

Carga de tráfico: 70 %

MIMO DL: MIMO 2x2

SENA mínima para MIMO: 13 dB

Tipo de ganancia MIMO: Fija Variable

Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO DL: 1.48

Parámetros típicos

Incremento de ruido: 3 dB

Factor de ruido: 2 dB

Alpha (control de potencia): 1

PO (control de potencia): -90 dBm

MIMO UL: MIMO 2x2

Tipo de ganancia MIMO UL: Fija Variable

Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO UL: 1.48

Figura 44: Parámetros 5G [2]

Planificador

Tipo de planificador: Proportional Fair (PF)

Ganancia PF scheduler DL: 6 dB

Ganancia PF scheduler UL: 6 dB

Curvas de eficiencia espectral definidas en el terminal de usuario

El comportamiento del planificador se evalúa utilizando la ganancia MIMO del sector y las curvas de eficiencia espectral definidas en los terminales de usuario. Para el cálculo de interferencia se utilizan las curvas por defecto del 3GPP en su lugar.

Curvas de eficiencia espectral definidas en el planificador

El comportamiento del planificador se evalúa utilizando las siguientes curvas de eficiencia espectral.

Curva Eficiencia Espectral DL

Curva Eficiencia Espectral DL con MIMO

Curva Eficiencia Espectral UL

Curva Eficiencia Espectral UL con MIMO

Figura 45: Planificador [2]

En el siguiente paso tenemos los parámetros del terminal como vemos en la figura 46. La frecuencia de transmisión queda fijada a la banda seleccionada al comienzo. La altura de la antena estará a 1.5 metros del suelo, siendo ésta la altura "media" de un ser humano a la que podría encontrarse el terminal móvil (UE) e introducimos el valor de la potencia que se ajusta a nuestros cálculos, en este caso 23 dBm.

Por último fijamos el valor de la sensibilidad del teléfono móvil del usuario, SS-RSRP threshold en -120 dBm, ya que por debajo de este umbral de cobertura el terminal móvil no funcionará correctamente. Este valor es utilizado por la señal Mejor Servidor para

determinar si un sector determinado sobrepasa el nivel mínimo configurado para optar a ser el transmisor deseado, como veremos en los siguientes apartados. Este valor de referencia se define por el 3GPP en el “3GPP TR 36.942” con un valor aconsejable por encima de los -128 dBm [28].



Figura 46: Configuración terminal [2]

XIRIO también nos permite la opción de elegir el método de cálculo y la resolución de cartografía. Podemos elegir un método acorde a nuestro proyecto teniendo en cuenta la zona de simulación, los rangos de frecuencia de nuestros terminales y el tipo de cartografía que utilizemos: rural, suburbana o urbana. Tal como hemos ido desarrollando en el TFM, elegiremos el 3GPP TR 38.901 como método de propagación ya que nos permite realizar la simulación de manera gratuita y también da la opción de seleccionar el tipo de celda, el margen de desvanecimiento y seleccionar el tipo de pérdidas por penetración en edificios entre otras (ver Figura 47).

La cartografía viene dada por capas, en este caso, seleccionamos la cartografía ‘Altimetría Mundial’ con resolución de 100 metros y la cartografía ‘Corine (Islas Canarias)’ con resolución de 50 metros (Figura 48); las capas de cartografía dependerán de la tarifa que tengamos contratada o del tipo de cuenta que utilizemos en XIRIO.

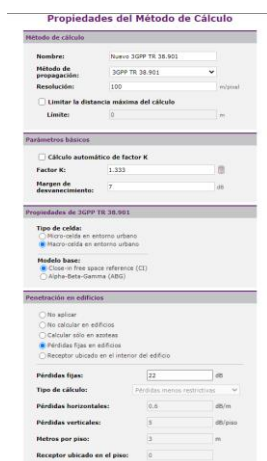


Figura 47: Propiedades del método de cálculo [2]

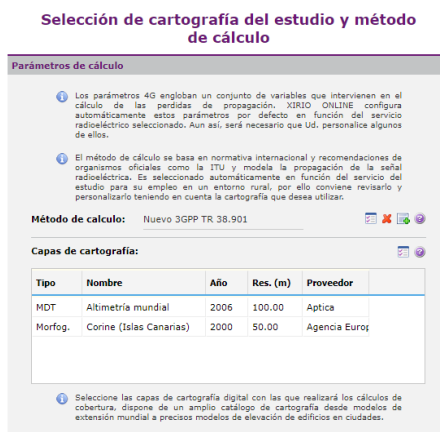


Figura 48: Cartografía [2]

Ahora definimos el área de cobertura donde se va a realizar el cálculo de cobertura. Estos valores no tienen por qué ser exactos, ya que cuando se acabe de crear la cobertura individual, se podrá elegir de forma manual el área exacta en el que nos interesa realizar los cálculos y así podremos ver en el mapa exactamente en qué área queremos simular el

cálculo de cobertura. Se han elegido los valores de la Figura 49 como referencia, próximos a los 790 metros obtenidos en el apartado de cálculo de cobertura.

Al realizar los cálculos de cobertura podemos establecer diferentes rangos de nivel de señal recibida. A cada intervalo se le asigna un color que para la posterior visualización de los resultados [26]. Tanto los rangos de nivel de señal como de colores pueden ser modificados según nuestras necesidades. Para hacerlo más intuitivo, crearemos una plantilla con un rango de colores con una separación de 5 dB entre cada intervalo. Aunque durante el desarrollo se modificarán algunos rangos para ajustar más a los resultados obtenidos (ver figura 50). Para asegurarnos de que las señales están por encima del mínimo de la sensibilidad establecida por el 3GPP, creamos un rango de colores que va desde -120 dBm hasta el infinito (positivo) e utilizaremos el mismo rango de señales para evitar cualquier tipo de confusión.

Llegados a este punto, el modo asistente de XIRIO finaliza su trabajo y crea automáticamente los tres sectores en los que hemos decidido dividir nuestra antena transmisora, lo podemos encontrar a la izquierda de la pantalla principal del simulador (ver Figura 51).

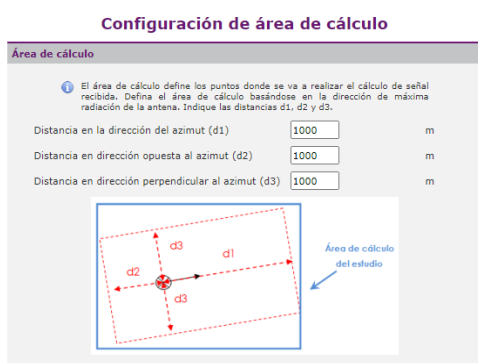


Figura 49: Definición del área de cobertura [2]



Figura 50: Rango de colores establecido [2]

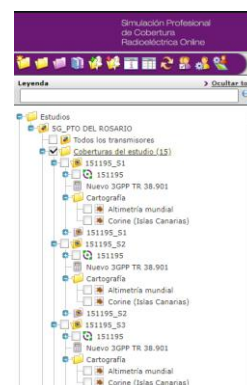


Figura 51: Sectores definidos [2]

Si necesitamos realizar cualquier cambio, en todo momento se pueden realizar las modificaciones que se crean necesarias, seleccionando cada cobertura y presionando la opción de 'Configurar Estudio'.

Finalmente procedemos a realizar el cálculo de cobertura por sector y como observamos en la figura 52, el área queda definida por un conjunto de colores acorde al rango definido anteriormente (ver Figura 50).

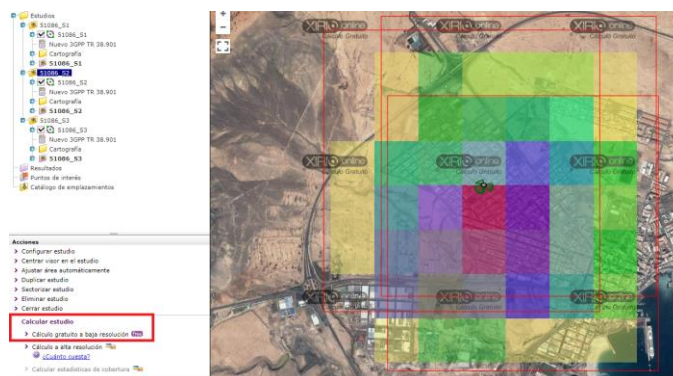


Figura 52: Calculo de estudio individual [2]

El siguiente paso será crear el resto de coberturas individuales que formarán los nodos de nuestra cobertura multitransmisor siguiendo los mismos pasos.



Figura 53: Coberturas individuales_1[2]



Figura 54: Coberturas individuales_2[2]

Como se observa en la imagen anterior, la representación o situación de las BTS queda bastante lejos del marco teórico, en cuanto agrupación. Las celdas suelen representarse como hexágonos, ya que por su forma hexagonal, al agruparse proporciona la mayor superficie sin dejar huecos ni producir solapamientos entre las mismas, por lo que, utilizando hexágonos, el número de celdas a usar para la cobertura de un área determinada será mínimo [29] [30]. En la figura podemos ver la colocación teórica de los transmisores, facilitando la reutilización de frecuencias entre celdas. También se elige esta forma hexagonal por su parecido con la circular, que es el área de cobertura en un entorno de propagación ideal, pero esta forma provoca solapes y no cubre totalmente el área de cobertura.

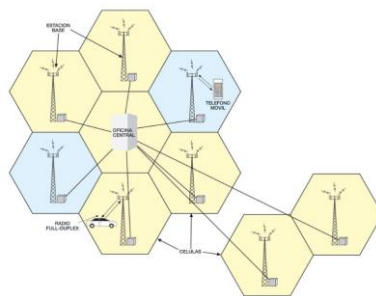


Figura 55: Estructura hexagonal celular [43]

6.3 Coberturas multitransmisor

Creadas todas las coberturas individuales, el siguiente paso es agruparlas en una cobertura multitransmisor (ver figura 54), donde combinaremos los estudios preliminares. Con este tipo de estudio queremos calcular la cobertura radioeléctrica que nos proporciona la red de BTS existente integrando la tecnología 5G [26].

El procedimiento es similar al de crear coberturas individuales, mediante el asistente, paso a paso vamos realizando las configuraciones oportunas. Comenzamos con el nombre del estudio y la elección de las coberturas (ver Figura 55) que queremos que formen este nuevo estudio, este último paso lo podemos realizar de varias maneras, o seleccionando una a una cada BTS o definiendo el área (ver Figura 56).



Figura 54: Creación Cobertura Multitransmisor [2]

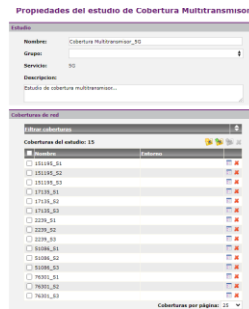


Figura 55: Nombre y coberturas [2]

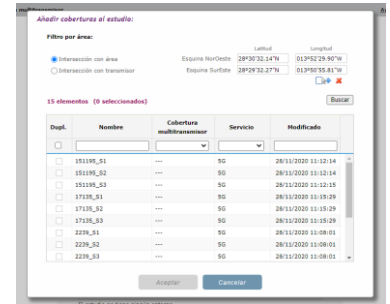


Figura 56: Selección de BTS [2]

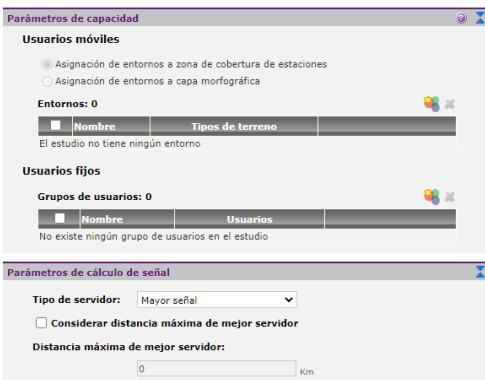


Figura 57: Capacidad y Cálculo de señal [2]

La misma pestaña nos da la opción de configurar los parámetros de capacidad y cálculo de señal, (ver Figura 57). En cuanto a la capacidad podemos configurar nuestras propias distribuciones de usuarios definiendo un entorno, pero en esta ocasión no va ser posible su uso porque conlleva un coste económico. Respecto al segundo, elegimos el de Mayor Señal, ya que considera como mejor servidor al que proporciona una mayor señal en cada punto geográfico.

En cuanto al área de cálculo definimos un área que englobe la superficie objeto de estudio, y en este caso se ha seleccionado un área de 17.26 km², el mismo que hemos empleado en el cálculo de presupuesto y, finalmente, añadimos las capas de cartografía de Altrimetría Mundial y Corine (Islas Canarias), como se puede (ver Figura 58).

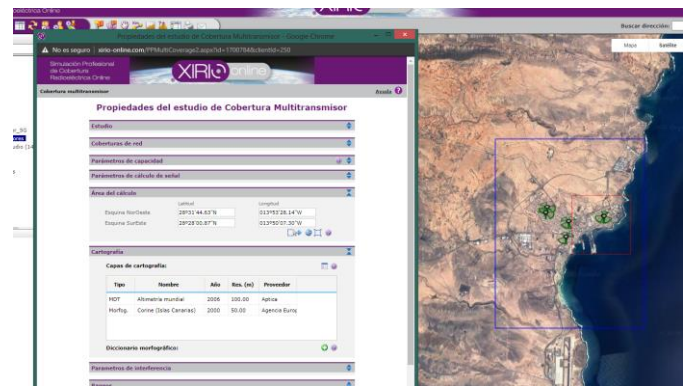


Figura 58: Área y cartografía [2]

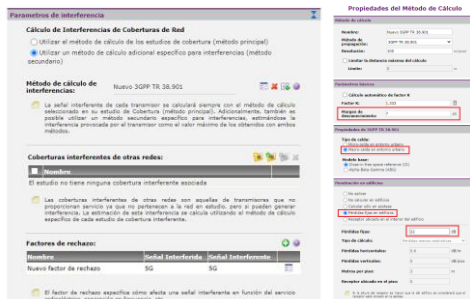


Figura 59: Parámetros de interferencia [2]

Sin cambiar de pestaña y para finalizar vamos a configurar los parámetros de interferencia y los rangos de colores. Respecto a los parámetros de interferencia (ver Figura 59), seleccionaremos el método que hemos ido aplicando en la consecución de este trabajo que es el 'modelo de propagación 3GPP TR 38.901 y lo configuraremos similar a los cálculos realizados.

Los rangos de colores los configuraremos con los mismos colores y mismo número de divisiones para evitar confusiones, aunque posiblemente puedan ser objeto de modificación para ajustar más aún los valores que deseamos conocer (ver Figura 60). Y una vez configurado todos los parámetros podemos realizar la simulación de la cobertura

multitransmisión, en nuestro caso será en baja resolución ya que estamos en modalidad gratuita. Validamos y calculamos precio (ver Figura 61). Si valida correctamente, en la esquina inferior derecha se nos abre la siguiente ventana de tareas donde se ve el estado de la simulación (ver Figura 62)

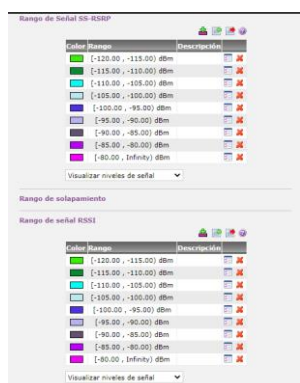


Figura 60: Rango de colores [2]

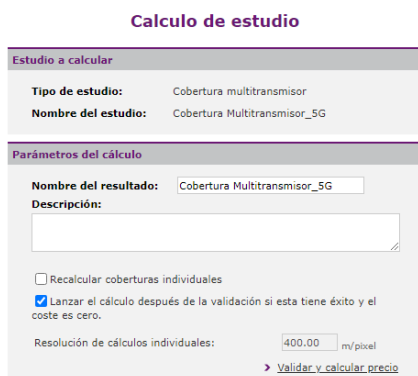


Figura 61. Calculo de estudio [2]



Figura 62. Tareas [2]

Con la simulación realizada (ver Figura 63), observamos un mapa con un conjunto de colores que según la cobertura que seleccionemos en el margen derecho nos dará unos valores en función del rango de colores configurado previamente. En este caso solo podemos optar a Señal SS-RSRP, Solapamiento y Mejor Servidor.

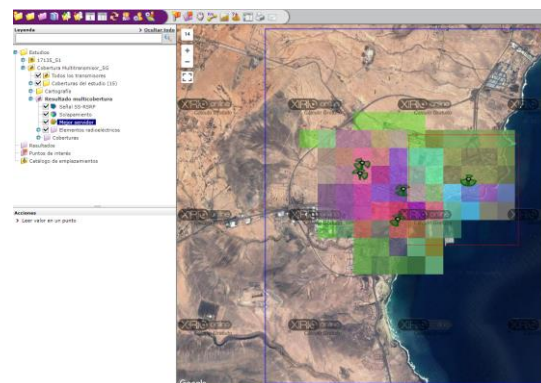


Figura 63: Simulación finalizada [2]

- La Señal SS-RSRP, es la potencia recibida de la señal de referencia de la señal de sincronización y nos indica el nivel de señal proporcionada por el transmisor 'mejor servidor' en cada punto entre todos los transmisores del estudio [26]. Con esta señal conocemos la ubicación de las antenas transmisoras ya que el terminal debe estar sincronizado con la celda objetivo.

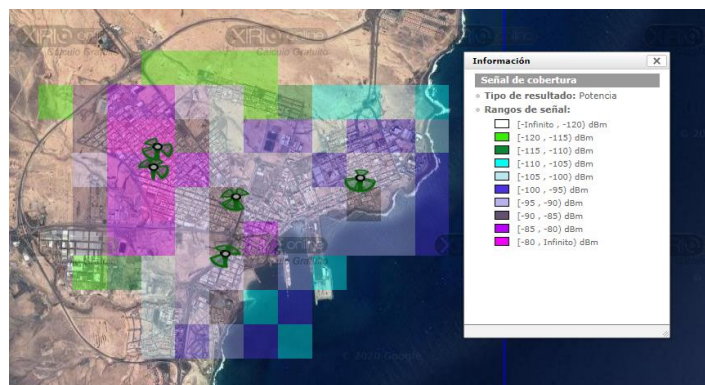


Figura 64: Señal SS-RSRP [2]

Fijándonos en las sombras de colores, sobre todo la de los extremos, vemos que hay zonas residenciales donde la cobertura es muy mala, llegando a sobrepasar el límite de los -120dBm (valor típico que podemos encontrar en los bordes de la célula), es decir, la señal se va perdiendo o atenuando; lo contrario ocurre en áreas centrales, donde los niveles si que son aceptables, desde -80 dBm hasta -105dBm, valores optimos si recordamos que el cálculo de presupuesto de enlace nos dio un valor de -103,92 dBm, como valor óptimo de enlace. Por lo tanto podemos afirmar que debemos realizar ajustes en nuestra red 5G, asunto que se tratará en los siguientes apartados.

- El Mejor Servidor, representa en cada punto el transmisor que ha sido elegido como "mejor servidor", en función del criterio marcado en los parámetros del estudio de cobertura multitransmisor. Un receptor ubicado en dicho punto establecerá la comunicación con el transmisor "mejor servidor" (ver Figura 65). También será analizado con más detenimiento en los siguientes apartados.

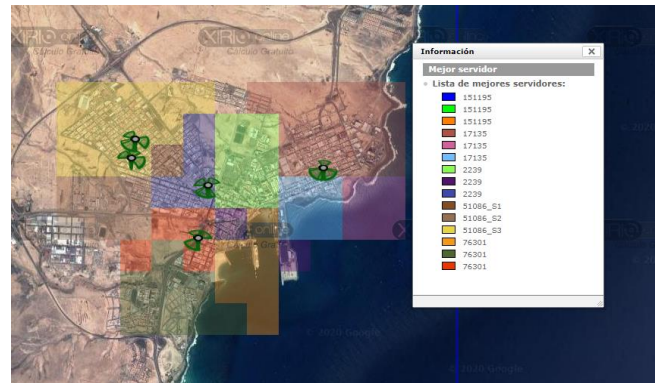


Figura 65: Mejor Servidor [2]

- Solapamiento, representa en cada punto el número de señales procedentes de distintos transmisores cuyo nivel es igual o superior al valor de umbral de recepción del receptor asociado, es decir, el número de transmisores que compiten por ser el "mejor servidor" en dicho punto. Este resultado puede proporcionar una imagen orientativa de zonas geográficas susceptibles de sufrir interferencias al tener una alta ocupación radioeléctrica (ver Figura 66). Será analizado con más detenimiento más adelante.

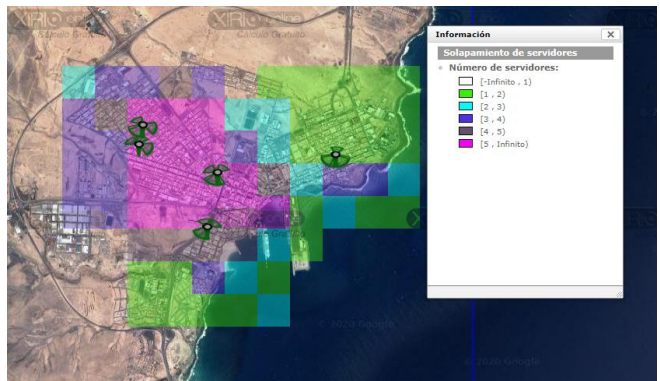


Figura 66: Solapamiento [2]

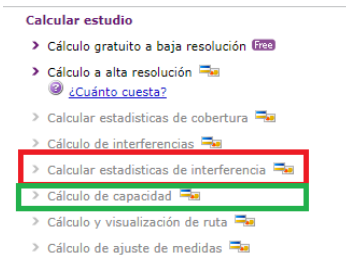


Figura 67: Cálculos permitidos [2]

La versión gratuita solo nos deja realizar estos tres cálculos, por tanto no podemos simular el cálculo de interferencias el cual se emplea tanto para estimar la aportación de una o varias fuentes de interferencia como su terminología y notación ni el cálculo de capacidad que para ello primeramente se debería haber simulado el de interferencia, puesto que la capacidad depende de la primera (ver figura 67).

6.4 Dimensionamiento y planificación

Llegados a este punto y una vez creada la simulación de cobertura multitransmisor, solo nos queda optimizar la red en base a los resultados de los cálculos realizado en el presupuesto, donde:

- Señal Objetivo → Presupuesto de enlace (Link Budget) = -103.92dBm,
- Radio de la celda = 790m,
- Número de #5G_gNodoB = 9.
- Tilt máximo = 6°

Con el fin de abarcar todo el área de cobertura propuesto y dar el mayor nivel de señal a cualquier terminal UE que se encuentre dentro del área de cobertura, vamos a seguir una serie de criterios para ajustar correctamente la red:

- Introduciremos nuevos nodos ajustándonos al máximo calculado para cubrir el resto de superficie donde no llega la señal.
- Para ajustar bien las coberturas, nos basaremos principalmente en la señal SS-RSRP, donde la modificación de los parámetros tales como cambio de la orientación, dar o quitar tilt a la antena, aumentar o disminuir potencia etc., puede hacer variar el valor de la señal recibida en un punto determinado.
- El nivel mínimo estipulado que debería de tener la señal SS-RSRP para que nuestro terminal funcionase correctamente, según hemos mencionado, son -120 dBm. Pero para realizar una buena planificación, es mejor dar un margen a dicha señal y en este caso lo ajustaremos en la medida de lo posible al valor del presupuesto (LinK Budget) en todas las zonas donde haya gran demanda de señal. La finalidad consiste en ajustar la red 5G todo lo posible a nuestros cálculos ante la hipotética construcción real de la red.

6.4.1 Dimensionamiento

En este apartado empezaremos por localizar la ubicación adecuada para crear los nuevos nodos con los que dar servicio a las zonas residenciales donde no existe cobertura del operador en estudio.

El diseño de cada nuevo nodo en la herramienta será similar al de cobertura individual que hemos desarrollado al comienzo del capítulo 6 para luego integrarlos en la cobertura.

Comenzaremos por la zona norte, concretamente el pueblo de Puerto Lajas (ver Figura 68), donde el operador no presta servicio y por tanto crearemos un nodo llamado Puerto Lajas que tendrá las siguientes características:

TIPO ESTACIÓN	ALTURA ANTENA (m)	ALTURA CUBIERTA (m)	REORIENTACIONES			Tilt		
			Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 1	Sector 2	Sector 3
TORRE	20	20	30º	150º	-	4º	6º	-

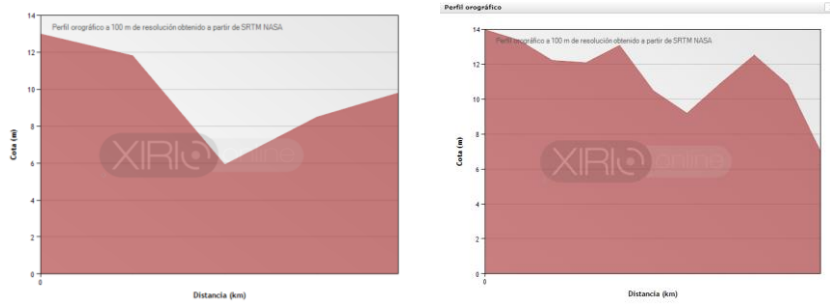
Tabla 31: datos nuevo nodo 5G [elaboración propia]



Figura 68: ubicación nodo Puerto Lajas [2]

:

El hecho de elegir ese punto se debe al perfil orográfico del terreno, ya que es uno de los puntos más altos de la zona



Sector 1 Sector 2
Figura 69: perfil orográfico Puerto Lajas [2]

Seguimos avanzando hacia el sur y nos encontramos la zona del polígono industrial La Hondura la derecha y justo debajo tenemos el barrio de la Majada Marcial, que en la primera simulación los valores de la señal SS-RSPR estaban muy por arriba del límite establecido en -120dBm. En este caso, nuestra BTS será una torre de celosía. El nodo se llamará Majada Marcial y sus características son:

TIPO ESTACIÓN	ALTURA ANTENA (m)	ALTURA CUBIERTA (m)	REORIENTACIONES			Tilt		
			Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 1	Sector 2	Sector 3
TORRE	30	30	45º	150º	230º	6º	6º	6º

Tabla 32: datos nuevo nodo 5G [elaboración propia]

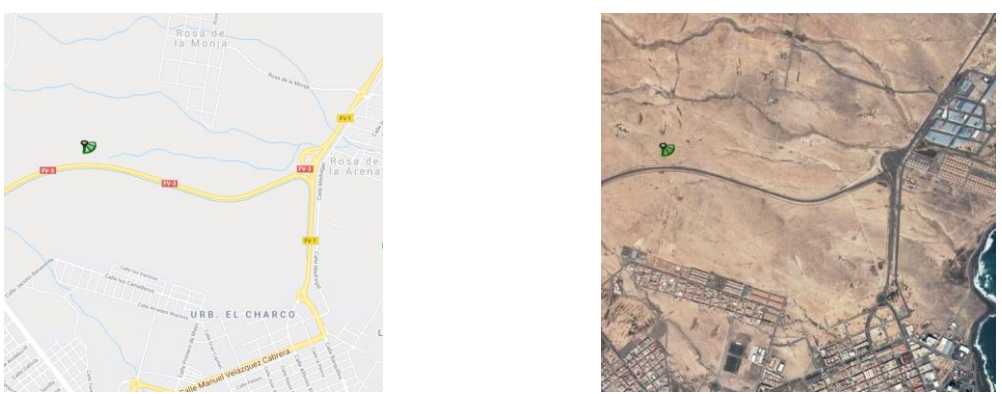
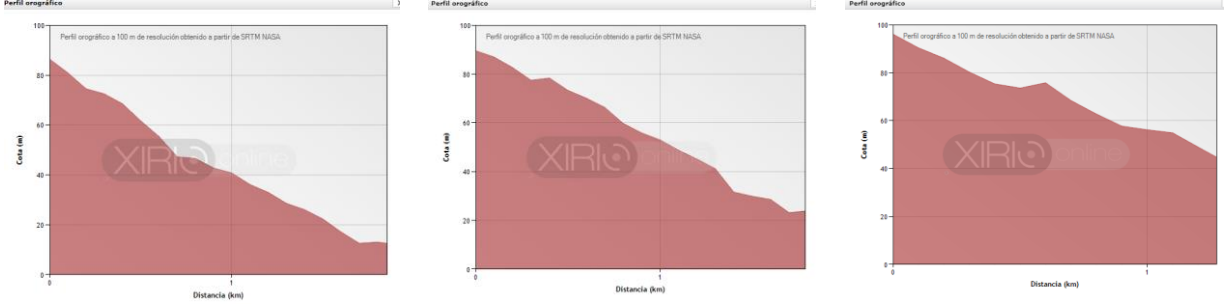


Figura 70: ubicación nodo Majada Marcial [2]

El perfil orográfico de cada sector se muestra a continuación, siendo los tres muy buenos, ya que tenemos amplia visibilidad del entorno sin obstáculos que nos dificulten la emisión.



Sector 1 Sector 2 Sector 3
Figura 71: perfil orográfico Majada Marcial [2]

Ahora nos situaremos en el núcleo central pero en la parte oeste, concretamente al polígono industrial de Risco Prieto, donde tampoco está el operador y si observamos la

captura de la SS-RSP vemos que la señal recibida es muy débil o apenas llega con suficiente fuerza. El nodo se llamará Risco Prieto y sus características son:

TIPO ESTACIÓN	ALTURA ANTENA (m)	ALTURA CUBIERTA (m)	REORIENTACIONES			Tilt		
			Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 1	Sector 2	Sector 3
TORRE	30	30	30°	70°	150°	6°	6°	6°

Tabla 33: datos nuevo nodo 5G [elaboración propia]

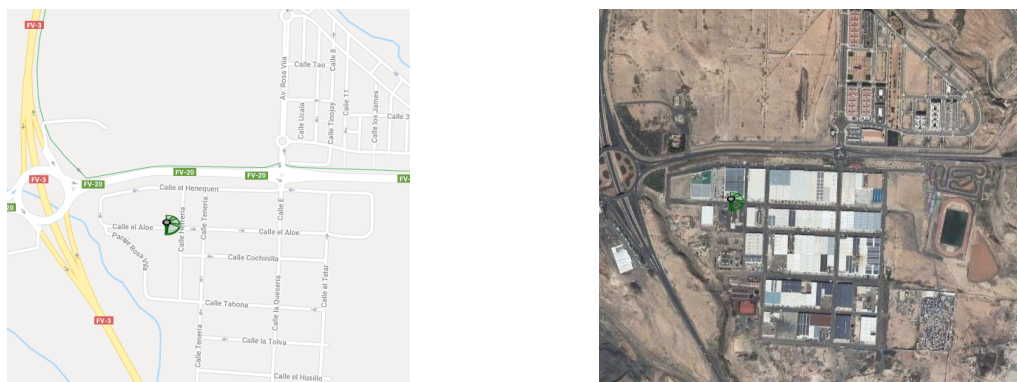


Figura 72: ubicación nodo Risco Prieto [2]

En el perfil orográfico de cada sector se muestra que podemos estar ante una buena ubicación, estamos en pendiente y con la altura dada a nuestras antenas la señal transmitida radie de manera homogénea en cada dirección de los sectores.

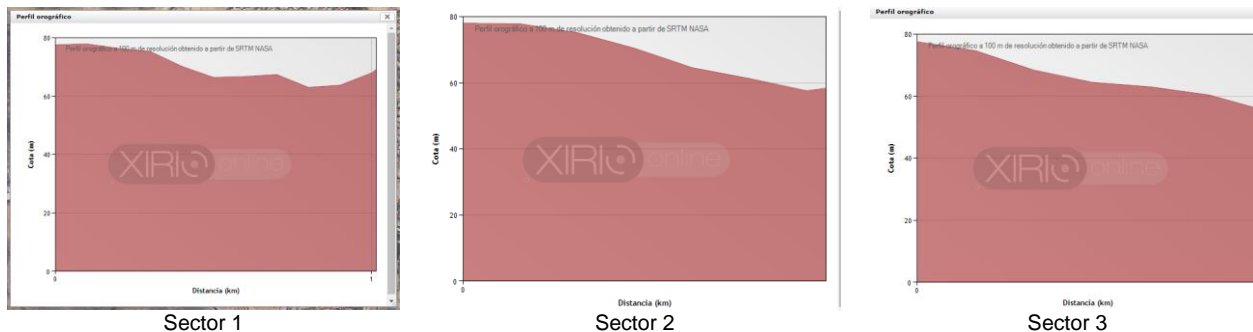


Figura 73: perfil orográfico Risco Prieto [2]

Y terminar de completar el dimensionamiento en base al número total de nodos 5G, avanzaremos en dirección sur, zona llamada Playa Blanca. Es una zona montañosa, con barrancos, con un perfil orográfico bastante singular, con esto quiero decir, que después de una montaña, puede venir un barranco y seguidamente una montaña aún mayor que la primera. El nodo se llamará Playa Blanca y sus características son:

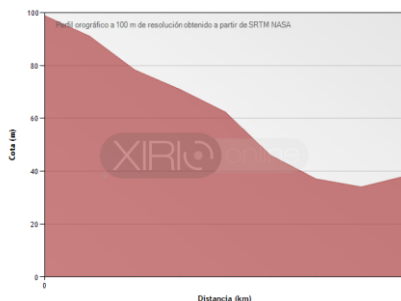
TIPO ESTACIÓN	ALTURA ANTENA (m)	ALTURA CUBIERTA (m)	REORIENTACIONES			Tilt		
			Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 1	Sector 2	Sector 3
TORRE	33	30	35°	125°	165°	4°	5°	3°

Tabla 34: datos nuevo nodo 5G [elaboración propia]

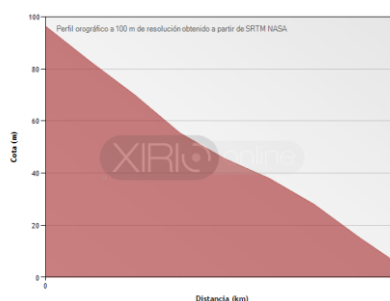


Figura 74: ubicación nodo Playa Blanca [2]

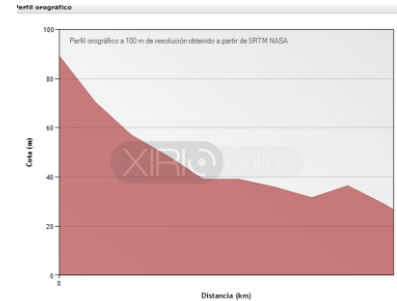
Se ha buscado una ubicación con bastante altura y además intentando que después de cada pendiente no haya una subida demasiado abrupta, ya que es un terreno bastante complejo. El perfil orográfico de cada sector se muestra a continuación:



Sector 1



Sector 2



Sector 3

Figura 75: perfil orográfico Playa Blanca [2]

6.4.2 Resectorización

Además se he planteado una resectorización de los emplazamientos existentes para intentar dar mejor servicio a zonas donde la señal antes no llegaba o llegaba demasiado débil muy por debajo del objetivo planteado en el apartado 6.4.

En la figura 76 se pueden ver los azimuts planteados y la configuración de tilts, quedando el planteamiento recogido en la tabla 34:

COD LOCALIZACION	COLOR FLECHAS	REORIENTACIONES			Tilt		
		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 1	Sector 2	Sector 3
51086	ROJAS	60	140	350	3	2	4
151195	AZULES	20	130	240	6	6	6
2239	AMARILLAS	0	40	180	2	2	2
76301	VIOLETAS	25	190	240	6	6	6
17135	VERDES	45	240	320	1	6	6

Tabla 35: datos reorientaciones [elaboración propia]



Figura 76: resectorización [elaboración propia]

La variación de los tilts se debe a la orografía del terreno y a los diferentes edificios que nos rodea imposibilitando que las emisiones sigan una trayectoria limpia. Así que hemos empezado con 6°, pero tras varias simulaciones en la herramienta hemos detectado nodos donde con tal valor, la señal SS-RSPR no llegaba con suficiente intensidad a su destino.

6.5 Resultados

6.5.1 Nivel de señal SS-RSPR

La señal SS-RSPR mide la potencia de la señal de un sector, excluyendo el ruido y la interferencia de los demás sectores. El rango de valores según el 3GPP va desde -44 a -140 dBm aunque los valores típicos van desde los -72dBm en zonas próximas al nodo hasta -120dBm [31]. Por tanto, podemos decir que esta medida nos da una estimación de la potencia recibida a nivel de celda.

Una vez concluidos los pasos anteriores, volvemos a simular para ver el resultado de los ajustes planteados tomando algunos valores en las zonas residenciales donde antes el nivel de señal no era bueno.

La figura 77, representa el nivel de señal global de cobertura proporcionado por los 9 nodos. A simple vista, fijándonos en el recuadro de información, podemos ver que la señal ha mejorado considerablemente, en algunas zonas porque no existía servicio del operador y en otros, porque el nivel de señal ha mejorado considerablemente.

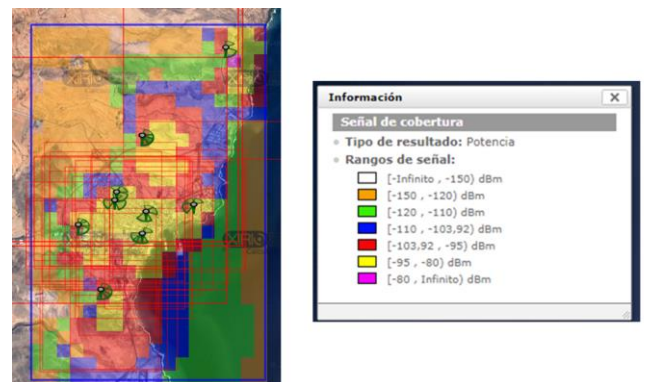


Figura 77: resectorización XIRIO [2]

En esta primera parte analizaremos la zona de acción de los nuevos nodos 5G, donde podemos observar en cada una de las capturas que se han tenido una cobertura bastante uniforme en las zonas deseadas, donde la señal está por encima del umbral del valor objetivo, por tanto, podemos afirmar que hasta aquí la planificación ha ido como esperábamos.

❖ 5G_gNodoB_Puerto Lajas



Sector 1
Sector 2
Figura 78: nivel de señal SS-RSPR Puerto Lajas [2]

❖ 5G_gNodoB_Majada Marcial



Figura 79: nivel de señal SS-RSPR Majada Marcial [2]

❖ 5G_gNodoB_Risco Prieto



Figura 80: nivel de señal SS-RSPR Risco Prieto [2]

❖ 5G_gNodoB_Playa Blanca



Figura 81: nivel de señal SS-RSPR Playa Blanca [2]

En cuanto a la zona central y con el apoyo de los nodo de Majada Marcial y Risco Prieto, observamos que la cobertura ha mejora considerablemente con respecto a la primera simulación e incluso en la zona norte, donde se ubica el nodo Maja Marcial, los niveles de señal SS-RSPR son inferiores a -120dBm.

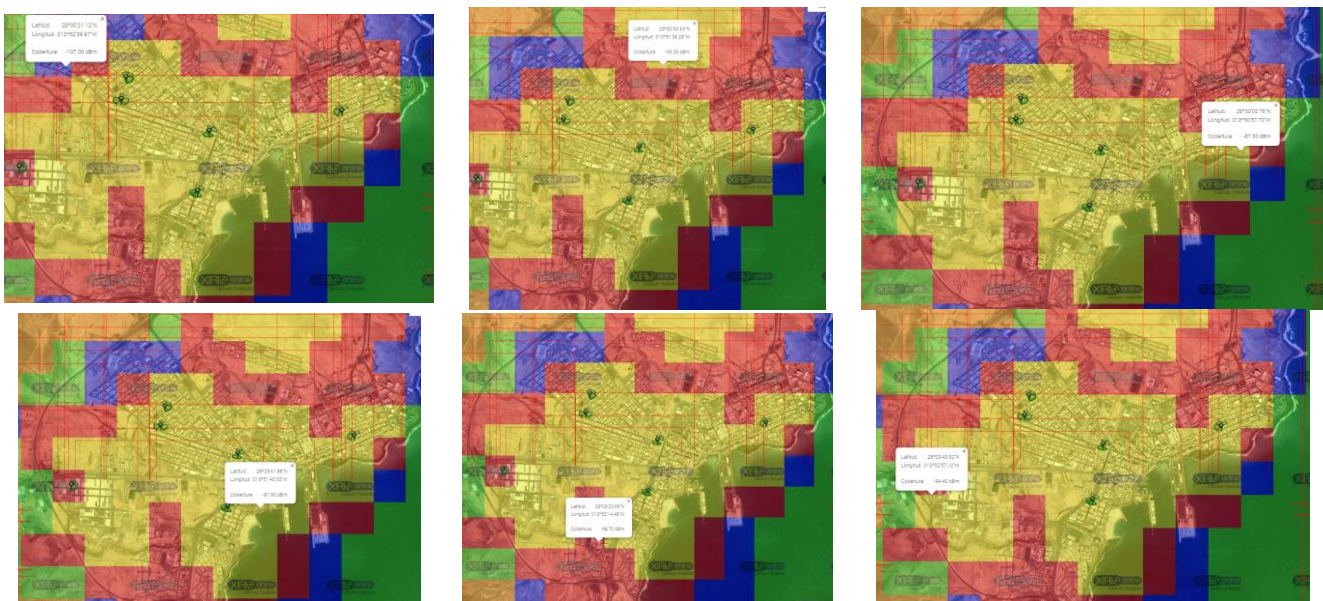


Figura 82: nivel de señal SS-RSPR zona centro [2]

Incluso podemos afirmar que yendo más allá del radio de 790m obtenido en los cálculos, el valor de la señal se va aproximando a los -120dBm valor límite considerado donde el nivel de señal comienza a atenuarse (ver Figura 83).

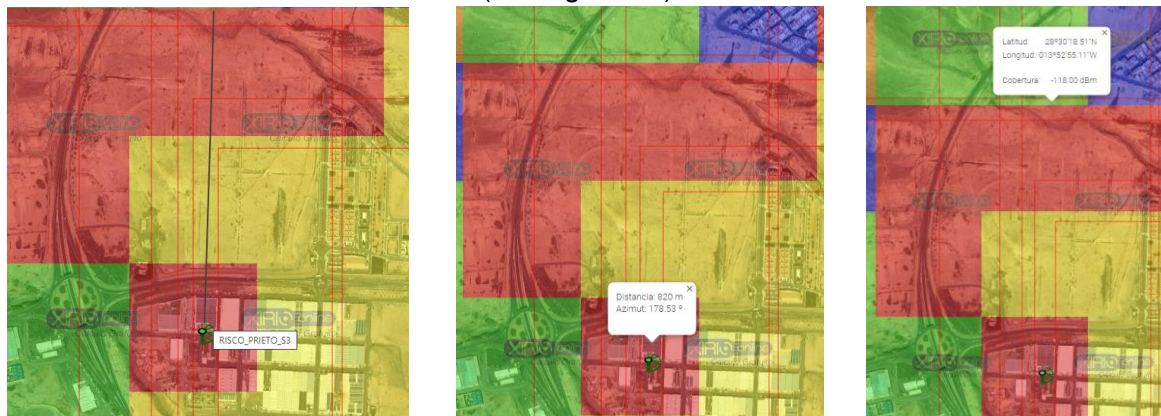


Figura 83: Relación radio y SS-RSPR [2]

6.5.2 Mejor Servidor

La herramienta nos proporciona cual es el mejor nodo cuando en un punto determinado tenemos varias emisiones de varias BTS a la vez por tanto es necesario saber cuál de ellos establece la mejor comunicación con un receptor (UT) situado en dicho punto, siendo este denominado transmisor deseado [32].

Existen varios criterios para que un transmisor pueda ser considerado como mejor servidor de cara a un UT:

- Distancia: La cercanía al punto de recepción además del valor de umbral de recepción de su receptor asociado.
- Mayor Señal: Aquellos nodos que tengan un mayor nivel de señal SS-RSPR.
- Mayor diferencia a umbral: Mayor diferencia con respecto al umbral de recepción del receptor asociado a su cobertura. Se puede dar el caso que varios nodos cumplan el mismo requisito y por tanto serán catalogados como mejor servidor.

Por norma general, el UT siempre se conectará a una antena o sector del mejor servidor que le proporcione el mejor nivel de señal en ese punto.

En nuestra planificación, nos basaremos en escoger como Mejor Servidor al que proporcione Mayor Señal.

Observando los resultados obtenidos, podemos ver a simple vista que el nodo de Majada Marcial por la mancha de sus colores es el que mayor alcance posee debido a estar situado en una posición más alta que la del resto de nodos, por tanto proporciona más alcance en cuanto a la longitud del radio de cobertura se refiere. Por esa razón es capaz de proporcionar mayor nivel de señal a una zona, aunque tenga más cercanos a otros nodos diferentes (ver Figura 84).

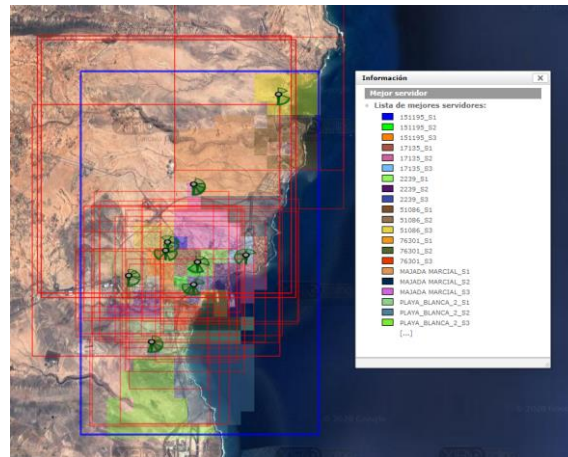


Figura 84: Mejor servidor [2]

6.5.3 Solapamiento

El solapamiento nos muestra el número de señales procedentes de distintos nodos en un determinado punto donde el nivel es igual o superior al valor de umbral de recepción del receptor asociado, con esto se quiere decir que cada BTS compite por ser el mejor servidor en ese punto.

El resultado también nos proporciona una visión de las zonas que podrían estar afectadas por interferencias debido a alta concentración de emisiones radioeléctricas [33].

Con este tipo de señal intentamos evitar en la medida de lo posible la concentración de muchos servidores ya que a veces puede causar más problemas que beneficios. Aunque a veces una alta concentración de transmisores puede ayudar de cara a que algún nodo falle por falta de suministro eléctrico, por parada de mantenimiento etc., así que si en una zona hay varios servidores 'mejor servidor' nos dará más garantía a proporcionar servicio correcto al/los UTI.

Como es normal, en las zonas centrales por la alta afluencia de nodos, se observa en la imagen como algunos puntos han quedado cubiertos por varios servidores. Debemos saber que debe existir un consenso entre el nivel SS-RSPR y el solapamiento, ya que si queremos niveles óptimos de señal irremediablemente ocurrirá que muchas zonas estarán influenciadas por varias BTS. A pesar de esto, vemos que los valores de Solapamiento son más que aceptables (ver Figura 85).

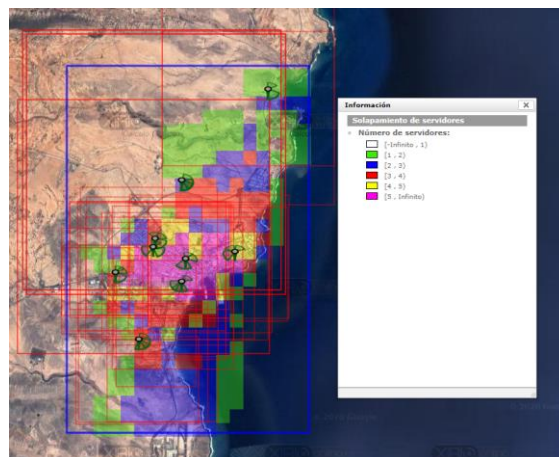


Figura 85: Solapamiento [2]

7. Emisiones Radioeléctricas

La telefonía móvil utiliza los campos electromagnéticos para su difusión a través del aire que se ha visto incrementado debido al aumento del número de usuarios, dadas las ventajas de poder establecer comunicaciones entre usuarios, cualquiera que sea su situación, y de poder mantener una comunicación establecida aunque uno o los dos comunicantes se estén desplazando. Para conseguir estos resultados es necesario desplegar una infraestructura de telecomunicaciones constituida por estaciones base.

7.1 Tipos de emisiones radioeléctricas (ER)

Esta denominación comprende distintos tipos de emisiones, dependiendo de la frecuencia de dichas ondas, comprendiendo no sólo las ondas empleadas en radiocomunicación, que son el objeto del actual debate y que, en adelante, denominaremos emisiones radioeléctricas, sino los rayos infrarrojos, la luz visible, la ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, producidos por la materia radiactiva.

Ionización: Un ión es un átomo o molécula al que se le ha arrancado un electrón. Cuando se crea un ión se dice que se ioniza la materia. De acuerdo a los postulados de la física cuántica, las radiaciones electromagnéticas constituyen tanto una propagación de ondas como de partículas, denominadas fotones. Estas partículas no tienen masa pero sí energía que es directamente proporcional a la frecuencia de la emisión. Si esta energía, al transferirse parcialmente a la materia, es suficiente para arrancar un electrón a los átomos y moléculas que la constituyen, se crean iones.

Radiación ionizante: Para ionizar la materia es necesario superar un determinado nivel de energía al que corresponde una determinada frecuencia. Las radiaciones con energía suficiente para crear iones se denominan "ionizantes".

Tipos de ER:

- Ionizantes: Alta frecuencia. Producen cambios en la estructura molecular de los tejidos vivos.
- No ionizantes: Baja frecuencia. No producen cambios en la estructura molecular de los tejidos vivos.

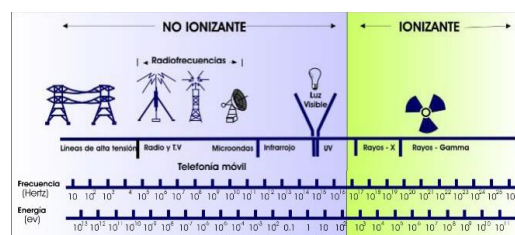


Figura 86: Ionizantes, no-ionizantes y bandas de frecuencia -energía para distintos usos [1]

La telefonía móvil en España emplea las siguientes bandas de frecuencias:

- GSM: 900 MHz.
- DCS: 1.800 MHz.
- UMTS: 900 MHz y 2.100 MHz
- LTE: 800MHz, 1.800 MHz, 2.300 MHz, 2.600 MHz
- 5G: 3400MHz, 3500MHz, 3600MHz

Las estaciones base emiten con la mínima potencia necesaria para evitar interferencias entre las distintas antenas y optimizar el consumo energético. Además el teléfono y la antena solo transmiten cuando hay conversación, suspendiéndose la comunicación en los periodos de silencio, con el objetivo de prolongar el tiempo de vida de las baterías de los terminales y optimizar recursos.

7.2 Efectos sobre la salud

Los primeros estudios datan de los años 50. Las OEM inducen corrientes eléctricas en los tejidos vivos, lo cual produce un aumento de temperatura. Los comités científicos han fijado los límites máximos de exposición, por debajo de los cuales se garantiza a toda la población, cualquiera que sea su edad o estado físico la ausencia de efectos perjudiciales para la salud.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m ²)
0-1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	—
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	—
10-400 MHz	28	$0,73/f$	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabla 36: Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos [1]

El parámetro más empleado para medir los efectos térmicos producidos, es la Tasa de Absorción Específica (TAE o SAR), que se define como la potencia absorbida por unidad de masa de tejido corporal.

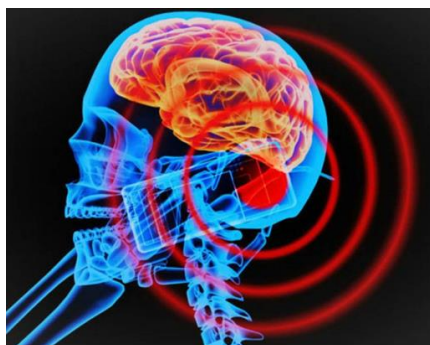


Figura 87: Tasa de absorción específica SAR [1]

Con la Tasa de Absorción Específica (TAE o SAR) y el nivel de densidad de potencia del campo electromagnético, las normativas fijan los límites de exposición a las emisiones radioeléctricas, utilizando unos factores de seguridad muy elevados sobre los niveles para los que aparecen los efectos biológicos señalados anteriormente.

Para controlar los niveles de exposición de las BTS existe un conjunto de órganos competentes y procedimientos administrativos:

- Inspecciones de las Jefaturas Provinciales.
- Autorizaciones administrativas previas a la emisión.
- Informes anuales de las operadoras.

Para poder implantar una BTS hay que seguir la siguiente metodología:

- Cálculo de los límites de seguridad. Paralelepípedos.
- Aislamiento de las zonas restringidas en caso necesario.
- Medición final de comprobación. (No es objeto de estudio en este TFM)

7.3 Límites de exposición

Todas las recomendaciones elaboradas y evaluadas por los diferentes grupos de expertos para identificar los niveles de exposición que pueden afectar a las personas incorporan un factor de seguridad ante la exposición a dichos campos electromagnéticos con objeto de tener un margen de seguridad alto sobre los distintos aspectos que pueden influir, como las condiciones ambientales presentes, la posible mayor sensibilidad térmica de ciertos grupos de población, como ancianos, niños y enfermos.

En la mayoría de los trabajos especifican dos tipos de límites según la exposición:

- Exposición controlada u ocupacional: los sujetos son conscientes de la exposición, pueden ejercer control sobre la misma y tomar las precauciones de seguridad necesarias.
- Exposición no controlada: es la exposición del público en general, que no es consciente de su exposición a campos electromagnéticos.

Los factores de seguridad suelen ser de 10 veces para la exposición ocupacional y de 50 veces para la exposición del público en general. Se definen dos tipos de restricciones:

- Restricciones básicas: son los niveles de exposición a los campos electromagnéticos para los que se pueden observar efectos térmicos en las personas. Se expresan en términos de la densidad de corriente en la cabeza y el tronco, y de la SAR media en todo el cuerpo y la SAR localizada (extremidades).
- Niveles de referencia: son los niveles, en términos de la intensidad de campo eléctrico, la intensidad de campo magnético y la densidad de potencia, utilizados para realizar las medidas experimentales y verificar que se cumplen las restricciones básicas.

7.4 Normativa vigente

A nivel nacional, la normativa en materia de emisiones radioeléctricas está contenida en el Real Decreto 1066/2001, de 28 de Septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a las mismas. La orden CTE /23/2002, de 11 de Enero por la que se establecen condiciones de presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones, como desarrollo de lo establecido en la Ley 23/2003, de 3 de Noviembre, General de Telecomunicaciones.

Asimismo, algunas Comunidades Autónomas y diversos Ayuntamientos han desarrollado sus propias normativas que complementan las disposiciones contenidas en la legislación estatal.

7.4.1 Real decreto 1066/2001

El Real Decreto 1066/2001, por el que se aprueba el Reglamento que establece las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones de las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a las mismas. Destacamos los siguientes capítulos de las disposiciones generales:

- Capítulo 2:
 - Artículo 3: Limitaciones y servidumbres para la protección de determinadas instalaciones radioeléctricas.

- Capítulo 3:
 - Artículo 6: Límites de exposición a las emisiones radioeléctricas. Restricciones básicas y niveles de referencia.
 - Artículo 7. Evaluación sanitaria de riesgos por emisiones radioeléctricas.

- Capítulo 4:
 - Artículo 8: Determinados requisitos para la autorización, criterios de planificación e instalación de estaciones radioeléctricas.
 - Artículo 9: Inspección y certificación de las instalaciones radioeléctricas.

- Capítulo 5:
 - Artículo 10: Otras restricciones a los niveles de emisiones radioeléctricas.

- Anexo I: Limitaciones y servidumbres para la protección de determinadas instalaciones radioeléctricas.

- Anexo II: Límites de exposición a las emisiones radioeléctricas.
 - Restricciones Básicas: restricciones a la exposición de los campos electromagnéticos basadas en los efectos sobre la salud conocidos y en consideraciones biológicas. Se utilizan en forma de tasa de absorción específica de energía SAR (W/Kg) y densidad de potencia S (W/m²). A efectos prácticos los valores definidos en las restricciones básicas no pueden ser comparados directamente con los resultados de las medidas realizadas en las estaciones por lo que se definen los niveles de referencia obtenidos a partir de las restricciones básicas.
 - Niveles de referencia: Son comparados con los valores de las magnitudes medidas. Si se cumplen los niveles de referencia, se asegura la satisfacción de las restricciones básicas. Si por el contrario el valor medido sobrepasa el nivel de referencia, debe efectuarse una evaluación detallada para ver si los niveles de exposición son inferiores a las restricciones básicas.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m^2)
0-1 Hz		$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \cdot 10^4/f^2$	$4 \cdot 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0.025-0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
0.8-3 kHz	$250/f$	5	6.25	
3-150 kHz	87	5	6.25	
0.15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	
10-400 MHz	28	$0,73/f$	0.092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

Tabla 35: Niveles de referencia según RD 1066/2001[1]

7.4.2 Orden CTE/23/2002

La Orden CTE/23/2002, por la que se establecen las condiciones de presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicio de radiocomunicación, como desarrollo de la Ley General de Telecomunicaciones (LTG).

De esta Orden destacamos:

- [Tipología de las estaciones radioeléctricas.](#)

Según la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) y de la ubicación de las estaciones radioeléctricas se distinguen 6 tipos:

- ER1: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima superior a 10 vatios, en entorno urbano.
- ER2: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima inferior o igual a 10 vatios, en entorno urbano.
- ER3: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima superior a 10 vatios, en cuyo entorno no urbano permanecen habitualmente personas.
- ER4: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima inferior o igual a 1 vatios, en cuyo entorno no urbano permanecen habitualmente personas.
- ER5: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima superior a 1 vatios, en cuyo entorno no urbano no permanecen habitualmente personas.
- ER6: Estaciones radioeléctricas con potencia isotrópica radiada equivalente máxima inferior o igual a 1 vatio.

- [Solicitud de autorización de estaciones radioeléctricas y certificación anual.](#)

Los operadores que instalen nuevas estaciones que den soporte a servicios de radiodifusión, deben presentar ante las Jefaturas, un proyecto técnico más detallado según el formato y estructura del Anexo I de la orden CTE/23/2002 incluyendo:

- Características técnicas de la estación y planos del entorno donde se ubica. Si las estaciones son del tipo ER1 o ER3 se debe incluir en los planos el cálculo del volumen de referencia, de modo que en el exterior del volumen no se superan los niveles de referencia. Si el volumen de referencia incide sobre zonas con presencia habitual de personas se debe incluir el vallado que restrinja el acceso de personal no

cualificado a la zona. Para las estaciones situadas en entornos urbanos ya sean del tipo ER1 o ER2 se deben incluir en los planos los espacios sensibles situados a menos de 100 metros tales como escuelas, hospitales, parques públicos etc.

- Valores de los niveles de emisión radioeléctrica, en los puntos que se considere más desfavorables. Si la estación es del tipo ER5 solo será necesaria la medición de los niveles de exposición en el entorno de las estaciones, si el volumen de referencia incide en zonas con presencia habitual de personas.
- En cuanto a la certificación anual, el Ministerio exige una serie de medidas en función de la tipología según el entorno donde este instalada la BTS durante el primer trimestre de cada año natural que se deben incluir en un informe según el formato y estructura del Anexo II de la Orden CTE/23/2002, emitida por técnico competente acreditando que se han respetado los límites de exposición establecidos durante el año anterior.
- Para instalaciones radioeléctricas que compartan emplazamiento, se contempla la posibilidad de presentar proyectos conjuntos, tanto si son del mismo o de distintos operadores, siempre que se llegue a acuerdos para el intercambio de la información necesaria para la elaboración de los informes.

- **Medidas radioeléctricas**

Las medidas se realizarán según el procedimiento previsto en la Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones. La Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital podrá exigir, en cualquier momento, la presentación del resultado de las medidas o cualquier otra documentación relacionada con el cumplimiento de los límites de exposición a las emisiones radioeléctricas.

La validez del estudio de los niveles de exposición será de tres meses, desde el momento en el que se realiza la medición hasta que se presenta el proyecto técnico en la Secretaría de Estado Sociedad de la Información y la Agenda Digital.

El anexo IV de la Orden CTE/23/2002, de 11, establece el procedimiento para la realización de medidas de niveles de emisión.

En el presente procedimiento se distinguen tres fases de medida:

Fase-1, fase-2 y fase-3, dependiendo del grado de precisión y de las características del proceso de mediciones. En todos los casos, habrá de tenerse en cuenta un conjunto de consideraciones y actuaciones necesarias para la realización de las medidas que se han resumido en lo que se denomina fase previa.

- Fase previa a las mediciones:

Previamente al proceso de medida, se deberá recopilar toda la información necesaria de la/s estación/es radioeléctrica/s a evaluar y su entorno, al objeto de asegurar que las mediciones se efectúen en puntos de máximo nivel de emisión en los espacios en los que puedan permanecer habitualmente personas, contemplando, para ello, tanto los factores del entorno, como los factores radioeléctricos que intervendrán en las mediciones.

- a) Factores del entorno de las estaciones:

Identificación de zonas en las que puedan permanecer habitualmente personas, próximas a los centros emisores, particularmente en la dirección de máxima radiación de las antenas emisoras. Presencia de edificios u otros obstáculos, estimando de que manera su presencia puede afectar a la medida (fundamentalmente en reflexiones).

Otros factores relevantes como presencia de espacios considerados sensibles (guarderías, centros de educación infantil, primaria, centros de enseñanza obligatoria, centros de salud, hospitales, parques públicos y residencias o centros geriátricos) en lugares próximos a las estaciones radioeléctricas...

b) Factores radioeléctricos:

Deberá tenerse en cuenta que el equipo de medida sea el más adecuado, en función del tipo de medida que vaya a realizarse. Además habrá de asegurarse que los equipos utilizados hayan sido calibrados y estén en el período válido de calibración dado por el fabricante. Deberá asegurarse que el umbral de detección de señal del equipo de medida sea considerablemente menor que cualquiera de los «niveles de decisión» que se señalan en los apartados siguientes.

Habrà de considerarse que los valores de referencia establecidos en el Real Decreto 1066/2001, son los valores RSM imperturbados. En consecuencia, se deberán realizar las mediciones de los campos electromagnéticos sin la presencia de elementos perturbadores para estos campos como pueda ser el cuerpo humano del operario que realiza las mediciones. Por ello, se utilizarán elementos adicionales para la medida, tales como trípodes no metálicos o mástiles, que permitan separar el equipo de medida del cuerpo del operario.

Se evaluará si, a tenor con el servicio radioeléctrico predominante y las frecuencias utilizadas por el mismo, el punto de medida estaría inmerso en la zona de «campo cercano» o en la zona de «campo lejano». Para ello sería necesario conocer la distancia entre el punto de medida y antena radiante. Si fuese preciso se utilizará un telémetro óptico. Como criterio práctico y aproximativo, para establecer el límite entre «campo cercano» y «campo lejano», se establece, para frecuencias inferiores a 1 GHz:

Si $d > 3\lambda$; «campo lejano» y Si $d < 3\lambda$; «campo cercano».

Donde «d» es la distancia desde el punto de medida a la antena cuya emisión se pretende medir y « λ » es la longitud de onda de la frecuencia en estudio.

Si el punto de medida estuviese en «campo cercano», sería necesario verificar las intensidades de campo eléctrico E (V/m), y magnético H (A/m), a fin de comparar con los valores establecidos, para cada caso.

Si el punto de medida se encontrase en «campo lejano», sólo sería necesario medir una de las magnitudes de intensidad de campo, deduciéndose la otra por las expresiones:

$$|E| = |H| \times \eta_0 \quad \text{y} \quad |H| = \frac{|E|}{\eta_0} \quad (\eta_0 = 377 \Omega) \quad (26)$$

Se realizarán, en esta fase previa, a las mediciones la «puesta a cero» del equipo, si éste lo requiere, a fin de garantizar unas mediciones libres de errores.

Se considerarán, a fin de llevar a cabo las mediciones con la mejor garantía de éxito, factores como: Tipo de servicio a medir; potencias que pueden ser usadas (temporalidad

de este factor para las estaciones radioeléctricas); polarización de las emisiones; directividad, altura, orientación, inclinación y dimensiones de antenas radiantes; posible presencia de otras fuentes de emisiones radioeléctricas y su aportación a la medida de exposición total en un emplazamiento determinado, y, en general, cualquier aspecto radioeléctrico que pueda condicionar el resultado de la medida.

Se recomienda la utilización de equipos de medida con posibilidad de almacenamiento de datos en su memoria interna, a fin de permitir el procesado de los mismos para la elaboración del informe final de medidas.

7.5 Volúmenes de protección

En este apartado describimos la metodología [1] utilizada para el cálculo del volumen de referencia para cada sector en estaciones. El volumen de referencia debe garantizar que en el exterior de dicho volumen no se superan los límites de exposición a las emisiones radioeléctricas.

7.5.1 Expresiones utilizadas para el cálculo

Para el cálculo de los niveles de exposición se aplicará el método expuesto en la Recomendación UIT-T K52, orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos.

Se muestra a continuación la disposición geométrica utilizada para los cálculos de la densidad de potencia, Donde:

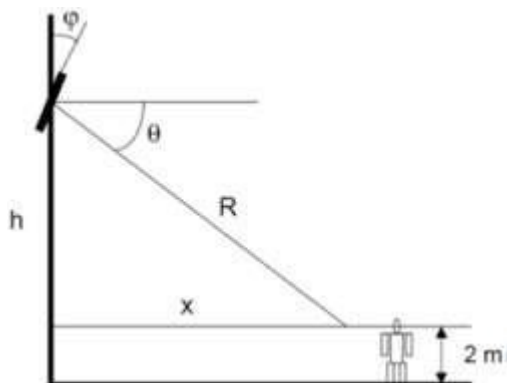


Figura 88: disposición geométrica [1]

- h : es la altura de la antena sobre la horizontal en la que se encuentra el punto a estudiar.
- x : es la distancia desde la vertical de la antena, hasta el punto que se desea estudiar.
- R : es la distancia desde el punto central de la antena al punto que se desea estudiar.
- Φ : ángulo de inclinación de la antena. Tilt.
- θ : ángulo que forman la horizontal por el punto donde está situada la antena y la dirección al punto que se desea estudiar.

Se ha considerado para el estudio que los puntos que se desean analizar se encuentran situados a 2m sobre la horizontal (altura de la cabeza de una persona que se desplace habitualmente). En base a lo argumentado, el procedimiento para los cálculos de los niveles de exposición en los puntos de estudio estimados se realizará siguiendo el siguiente desarrollo:

Para cada punto de estudio tenemos que tener en cuenta los siguientes datos:

1. Distancia entre el punto de medida y el soporte de la antena.
2. El acimut respecto del norte geográfico evaluado desde el soporte de la antena al punto de medida.
3. Nivel de señal preexistente en el punto de estudio: Este valor de señal en w/m^2 se relaciona con el de densidad del campo eléctrico mediante la expresión:

$$S = \frac{|E|^2}{377} \quad (27)$$

A continuación seleccionamos el sector cuyo acimut influye mayoritariamente sobre el punto en estudio y aplicamos la expresión siguiente:

$$S_C = S_{preexistente} + \sum_{i=1}^n \frac{PIRE_i \cdot N^{\circ}TRXs_i}{4\pi \cdot [x^2 + (h-2)^2]} F[\theta - \varphi] \quad (28)$$

Donde i representa cada una de las tecnologías que emite la antena en cuestión. Seguidamente se presentan los cálculos realizados para definir el volumen de referencia fuera del cual se asegura que se cumplen los límites establecidos en el Real Decreto 1066/2001.

Conocidos los siguientes datos:

- Frecuencias (f)
- Máxima potencia por portadora (Pmax)
- Número de portadoras (N)
- Diagrama de radiación de la antena (F(θ, Φ) y su máxima ganancia G(θ, Φ)
- Downtilt (°)

En nuestro caso se ha establecido como volumen de referencia un paralelepípedo, cuyas dimensiones se definen desde la parte más externa de los elementos radiantes como muestra la figura, mediante las siguientes expresiones:

Donde:

$$D_{max} = \sqrt{\frac{M * PIRE}{4 * \pi * S_{max}}}$$

$$L_{m1} = D_{max}$$

$$L_{m2} = D_{max} \sqrt{G(\theta_A)} * \cos(\theta_A)$$

$$L_{H1} = D_{max} \sqrt{G(\theta_{H1})} * \cos(\theta_{H1})$$

$$L_{H2} = D_{max} \sqrt{G(\theta_{H2})} * \cos(\theta_{H2})$$

$$L_{V1} = D_{max} \sqrt{G(\theta_{V1})} * \cos(\theta_{V1})$$

$$L_{V2} = D_{max} \sqrt{G(\theta_{V2})} * \cos(\theta_{V2}) \quad (29)$$

- M es 4 si se considera la reflexión total de un rayo, 2.56 si se considera las condiciones de reflexión típicas y 1 si no se considera ninguna reflexión.
- Pmax es la potencia máxima de transmisión
- G(θ, Φ) es la ganancia de la antena
- PIRE es el producto de Pmax · G(θ, Φ).
- Smax es la densidad de potencia máxima permitida para las frecuencias de trabajo (ver tabla 87).
- θA, θH1, θH2, θV1 y θV2 son los ángulos en que la proyección, sobre el eje del corte correspondiente del diagrama de radiación, es máxima. Las dimensiones del paralelepípedo se pueden ver en la figura 90.

Servicio		Frecuencia significativa de trabajo	Smax (W/m ²)
Radiodifusión	FM	100 MHz	2,00
Telefonía móvil	LTE 800	800 MHz	4,00
	GSM 900	900 MHz	4,50
	UMTS 900	900 MHz	4,50
	DCS 1800	1800 MHz	9,00
	LTE 1800	1800 MHz	9,00
	UMTS 2100	2100 MHz	10,00
	LTE 2600	2100 MHz	10,00
	5G	3500 - 3700 MHz	10,00

Tabla 37: densidad de potencia máxima permitida [1]

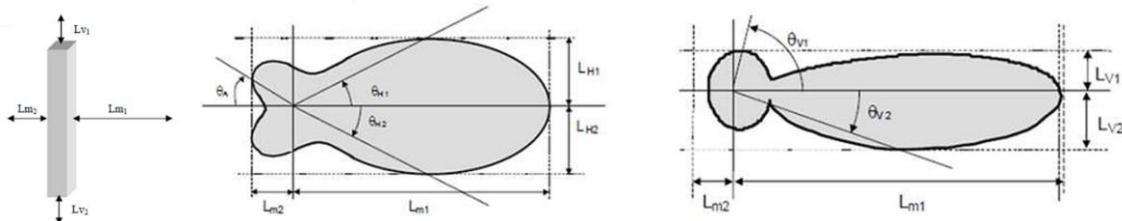


Figura 89: representación de volúmenes [1]

7.5.2 Supuestos tenidos en cuenta para el cálculo

Los supuestos que se han tenido en cuenta al aplicar estas expresiones, aún no siendo realistas, suponen el peor de los casos, es decir, la situación en la que se va a obtener un campo mayor:

- La estación se considera dimensionada al 100% de sus recursos.
- Se supone que todas las portadoras emiten con PIRE máxima.
- Para el cálculo de la PIRE máxima total de cada tecnología se ha multiplicado la PIRE del BCCH por el número de portadoras. (se considera 1 portadora para este TFM)
- Se supone la estación cargada al máximo de tráfico, no aplicándose factores de actividad para tener en cuenta el tráfico cursado en media.
- No se aplican factores de reducción de potencia para tener en cuenta los mecanismos de control de potencia activos en la red 'EL OPERADOR'.
- No se aplican factores de reducción de potencia para tener en cuenta los mecanismos de transmisión discontinua activos en la red 'EL OPERADOR'.
- Se supone propagación en espacio libre, sin incluir posibles atenuaciones por difracción.
- Se considera el plano de inspección a 2m de altura para simular la altura de una persona.

En el caso de estaciones que presenten varias tecnologías radiando en una zona común, se ha procedido también suponiendo el caso más desfavorable, caso peor: (volumen compuesto).

- Se han calculado las distancias de referencia para cada tecnología. Y se han sumado cuadráticamente.
- Se ha representado en cada antena transmisora el paralelepípedo resultante de la suma cuadrática de distancias de todas las tecnologías: volumen compuesto.

- Si la altura ($L_{v1} + L_{v2}$) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

7.5.3 Consideración de los niveles preexistentes

- Para estaciones de nueva instalación en un emplazamiento nuevo, donde no existen otras tecnologías coexistentes, los niveles preexistentes en el cálculo del paralelepípedo se tiene en cuenta de la siguiente forma:

$$D'_{max} = \left[\frac{M * PIRE}{4 * \pi * S'_{max}} \right]^{1/2}$$

$$S'_{max} = S_{max} - S_{prex} \quad (30)$$

Sprex es la densidad de potencia preexistente medida máxima, asociada a cada sector. Tomar este valor para calcular las dimensiones del paralelepípedo también implica situarse en el peor de los casos. Con esta suposición, cuanto mayor sea el nivel preexistente, mayores serán las dimensiones resultantes del paralelepípedo, es decir, se supone un paralelepípedo de mayores dimensiones siempre, aunque el nivel preexistente no se corresponda con el máximo elegido.

En el apartado 7.5.1 se dan las expresiones para el cálculo de volúmenes de referencia simples, que únicamente tienen en cuenta la antena asociada y la consideran como independiente y aislada.

- Para tener en cuenta el efecto de otras tecnologías u operadores coexistentes, es necesario calcular los volúmenes de referencia compuestos.

Caso de sectores con antenas radiantes de varias tecnologías.

Se procede suponiendo un caso bastante desfavorable:

Se calculan las distancias de referencia para cada tecnología según descrito en punto 7.5.1 y se suman cuadráticamente, excepto en las distancias L_{v1} y L_{v2} (ver figura 89) donde se considera la distancia mayor de los dos sistemas. Se representa en cada antena transmisora el paralelepípedo resultante de esta suma cuadrática.

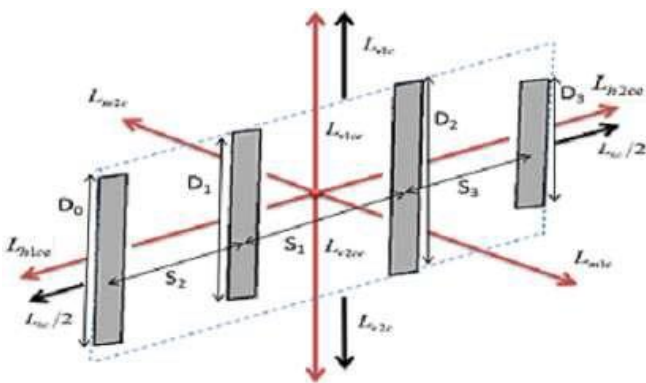


Figura 90: dimensiones sistema de antenas

$$L_{m1c} = \sqrt{L_{m1}^2(A0) + L_{m1}^2(A1) + L_{m1}^2(A2) + L_{m1}^2(A3)}$$

$$L_{m2c} = \sqrt{L_{m2}^2(A0) + L_{m2}^2(A1) + L_{m2}^2(A2) + L_{m2}^2(A3)}$$

$$L_{v1ce} = \frac{\text{Max}(D_0, D_1, D_2, D_3)}{2} + L_{v1c}$$

$$L_{v2ce} = \frac{\text{Max}(D_0, D_1, D_2, D_3)}{2} + L_{v2c}$$

$$L_{h1ce} = S_2 + L_{hc}/2 + S_1/2$$

$$L_{h2ce} = S_3 + L_{hc}/2 + S_1/2$$

(31)

Fórmulas en función de la figura donde se calculan las dimensiones del paralelepípedo

7.6.4 Resultados

Emplazamiento: Código de Localización 51086

En este emplazamiento están co-ubicados Vodafone (VDF) y Telefónica (TME) donde ambos operadores comparten antena, concretamente el modelo CV3PX308R1 y la potencia de la unidad remota de radio (rru) son 60W. Para el 5G de VDF se utiliza el modelo AAU5613 (ver ANEXO).

BANDA	PIREs (W)
GSM	1968
UMTS 900	2200
UMTS 2100	4400
LTE1800	4496
5G 3500	4496

BANDA	PIREs (W)
UMTS 2100	1493,31
LTE1800	1361,92
LTE2100	1493,31

Tabla 38: Pires estándar Vodafone [elaboración propia]

Tabla 39: Pires Telefónica (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

Por tanto, el cálculo de las dimensiones del paralelepípedo de referencia para la Estación Base objeto del estudio de niveles de exposición, quedaría definido con los siguientes valores:

VOLUMENES DE REFERENCIA INDIVIDUALES						
BANDA	SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
GSM - VDF	S1	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
	S2	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
	S3	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
LTE1800 - VDF	S1	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
	S2	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
	S3	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
U2100 - VDF	S1	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
	S2	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
	S3	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
U900 - VDF	S1	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
	S2	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
	S3	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
5G - VDF	S1	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S2	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S3	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
U2100 - TME	S1	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S2	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S3	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
LTE1800 - TME	S1	3,47	0,16	2,74	0,22	0,22
	S2	3,47	0,16	2,56	0,22	0,22
	S3	3,47	0,16	2,56	0,22	0,22
LTE2100 - TME	S1	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S2	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S3	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20

Tabla 40: Valores de referencia individuales [elaboración propia]

VOLUMENES DE REFERENCIA COMPUESTOS EQUIVALENTES					
SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
S1	14,71	0,67	10,41	1,46	1,46
S2	14,71	0,67	10,41	1,46	1,46
S3	14,71	0,67	10,41	1,46	1,46

Tabla 41: Valores de referencia compuestos [elaboración propia]

NOTA: Si la altura (Lv1 + Lv2) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

Emplazamiento: Código de Localización 151195

En este emplazamiento están co-ubicados Vodafone (VDF) y Telefónica (TME) donde el primero utiliza el modelo de antena K742270 y TME el modelo CV3PX308R1 y la potencia de la unidad remota de radio (rru) son 60W. Para el 5G de VDF se utiliza el modelo AAU5613 (ver ANEXO).

BANDA	PIREs (W)
GSM	1968
UMTS 900	2200
LTE800	3170
LTE1800	4496
5G 3500	4496

Tabla 42: Pires estándar Vodafone [elaboración propia]

BANDA	PIREs (W)
GSM	1426,10
UMTS 900	1426,10
LTE800	1330,92
UMTS 2100	1493,31
LTE1800	1361,92
LTE2100	1493,31

Tabla 43: Pires Telefónica (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

Por tanto, el cálculo de las dimensiones del paralelepípedo de referencia para la Estación Base objeto del estudio de niveles de exposición, quedaría definido con los siguientes valores:

VOLUMENES DE REFERENCIA INDIVIDUALES						
BANDA	SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
LTE800 - VDF	S1	7,94	0,35	6,20	0,66	0,66
	S2	7,94	0,35	6,20	0,66	0,66
	S3	7,94	0,35	6,20	0,66	0,66
GSM - VDF	S1	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
	S2	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
	S3	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
LTE1800 - VDF	S1	6,00	0,34	4,62	0,25	0,25
	S2	6,00	0,34	4,62	0,25	0,25
	S3	6,00	0,34	4,62	0,25	0,25
U900 - VDF	S1	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
	S2	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
	S3	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
5G - VDF	S1	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S2	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S3	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
LTE800 - TME	S1	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35
	S2	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35
	S3	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35
U900 - TME	S1	5,80	0,33	4,35	0,37	0,37
	S2	5,80	0,33	4,35	0,37	0,37
	S3	5,80	0,33	4,35	0,37	0,37
GSM - TME	S1	6,43	0,36	4,82	0,41	0,41
	S2	6,43	0,36	4,82	0,41	0,41
	S3	6,43	0,36	4,82	0,41	0,41
U2100 - TME	S1	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S2	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S3	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
LTE1800 - TME	S1	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22
	S2	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22
	S3	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22

Tabla 44: Valores de referencia individuales [elaboración propia]

VOLUMENES DE REFERENCIA COMPUESTOS EQUIVALENTES					
SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	lv2 (m)
S1	18,27	0,88	13,63	1,79	1,79
S2	18,27	0,88	13,63	1,79	1,79
S3	18,27	0,88	13,63	1,79	1,79

Tabla 45: Valores de referencia compuestos [elaboración propia]

NOTA: Si la altura (Lv1 + Lv2) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

Emplazamiento: Código de Localización 22396

En este emplazamiento están co-ubicados Vodafone (VDF) y Orange (ORG) donde el primero utiliza el modelo de antena CVV65BSX-M y OSP el modelo CV3PX308R1 y la potencia de la unidad remota de radio (rru) son 60W. Para el 5G de VDF se utiliza el modelo AAU5613 (ver ANEXO).

BANDA	PIREs (W)
GSM	1968
UMTS 900	2200
LTE1800	4496
5G 3500	4496

Tabla 46: Pires estándar Vodafone [elaboración propia]

BANDA	PIREs (W)
UMTES 2100	2260,22

Tabla 47: PIRE Orange (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

Por tanto, el cálculo de las dimensiones del paralelepípedo de referencia para la Estación Base objeto del estudio de niveles de exposición, quedaría definido con los siguientes valores:

VOLUMENES DE REFERENCIA INDIVIDUALES						
BANDA	SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
GSM - VDF	S1	5,90	0,19	4,23	0,35	0,35
	S2	5,90	0,19	4,23	0,35	0,35
	S3	5,90	0,19	4,23	0,35	0,35
LTE1800 - VDF	S1	6,00	0,21	4,87	0,21	0,21
	S2	6,00	0,21	4,87	0,21	0,21
	S3	6,00	0,21	4,87	0,21	0,21
U2100 - VDF	S1	5,92	0,37	4,62	0,19	0,19
	S2	5,92	0,37	4,62	0,19	0,19
	S3	5,92	0,37	4,62	0,19	0,19
U900 - VDF	S1	6,24	0,20	4,48	0,37	0,37
	S2	6,24	0,20	4,48	0,37	0,37
	S3	6,24	0,20	4,48	0,37	0,37
5G - VDF	S1	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S2	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S3	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
U2100 - ORG	S1	4,24	0,27	3,31	0,13	0,13
	S2	4,24	0,27	3,31	0,13	0,13
	S3	4,24	0,27	3,31	0,13	0,13

Tabla 48: Valores de referencia individuales [elaboración propia]

VOLUMENES DE REFERENCIA COMPUESTOS EQUIVALENTES					
SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
S1	14,09	0,57	10,22	1,29	1,29
S2	14,09	0,57	10,21	1,29	1,29
S3	14,09	0,57	10,22	1,29	1,29

Tabla 49: Valores de referencia compuestos [elaboración propia]

NOTA: Si la altura (Lv1 + Lv2) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

Emplazamiento: Código de Localización 17135

En este emplazamiento están co-ubicados Vodafone (VDF), Telefónica (TME) y Orange (ORG) donde los tres utilizan el modelo de antena CV3PX308R1 y la potencia de la unidad remota de radio (rru) son 60W. Para el 5G de VDF se utiliza el modelo AAU5613 (ver ANEXO).

BANDA	PIREs (W)
GSM	1968
UMTS 900	2200
UMTS 2100	4400
LTE1800	4496
5G 3500	4496

Tabla 50: Pires estándar Vodafone [elaboración propia]

BANDA	PIREs (W)
UMTES 2100	1493,31
LTE1800	1361,92

Tabla 51: PIREs Orange (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

BANDA	PIREs (W)
GSM	1426,10
UMTS 900	1426,10
LTE800	1330,92

Tabla 52: PIRE Orange (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

Por tanto, el cálculo de las dimensiones del paralelepípedo de referencia para la Estación Base objeto del estudio de niveles de exposición, quedaría definido con los siguientes valores:

VOLUMENES DE REFERENCIA INDIVIDUALES						
BANDA	SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
GSM - VDF	S1	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
	S2	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
	S3	5,90	0,33	4,42	0,38	0,38
LTE1800 - VDF	S1	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
	S2	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
	S3	6,00	0,27	4,31	0,38	0,38
U2100 - VDF	S1	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
	S2	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
	S3	5,92	0,26	4,25	0,34	0,34
U900 - VDF	S1	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
	S2	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
	S3	6,24	0,35	4,67	0,40	0,40
5G - VDF	S1	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S2	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S3	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
U2100 - TME	S1	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S2	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
	S3	3,45	0,15	2,47	0,20	0,20
LTE1800 - TME	S1	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22
	S2	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22
	S3	3,47	0,16	2,71	0,22	0,22
U900 - ORG	S1	5,02	0,28	3,76	0,32	0,32
	S2	5,02	0,28	3,76	0,32	0,32
	S3	5,02	0,28	3,76	0,32	0,32
L1800 - ORG	S1	3,47	0,16	2,49	0,22	0,22
	S2	3,47	0,16	2,49	0,22	0,22
	S3	3,47	0,16	2,49	0,22	0,22
LTE800 - ORG	S1	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35
	S2	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35
	S3	5,15	0,32	3,91	0,35	0,35

Tabla 53: Valores de referencia individuales [elaboración propia]

VOLUMENES DE REFERENCIA COMPUESTOS EQUIVALENTES					
SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	lv2 (m)
S1	16,38	0,79	11,77	1,57	1,57
S2	16,38	0,79	11,77	1,57	1,57
S3	16,38	0,79	11,77	1,57	1,57

Tabla 54: Valores de referencia compuestos [elaboración propia]

NOTA: Si la altura (Lv1 + Lv2) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

Emplazamiento: Código de Localización 76301

En este emplazamiento están co-ubicados Vodafone (VDF) y Orange (ORG) donde para la banda baja (LB) utilizan el modelo K742270 y para banda alta (HB) el modelo Powerwave 7760,02 y la potencia de la unidad remota de radio (rru) son 60W. Para el 5G de VDF se utiliza el modelo AAU5613 (ver ANEXO).

BANDA	PIREs (W)
GSM	1968
UMTS 900	2200
UMTS 2100	4400
LTE1800	4496
5G 3500	4496

Tabla 55: Pires estándar Vodafone [elaboración propia]

BANDA	PIREs (W)
GSM	11213,81
UMTS 900	1213, 81
UMTES 2100	1493,31
LTE800	1107,01
LTE1800	2158,50

Tabla 56: PIREs Orange (fórmula apartado 7.5.2) [elaboración propia]

Por tanto, el cálculo de las dimensiones del paralelepípedo de referencia para la Estación Base objeto del estudio de niveles de exposición, quedaría definido con los siguientes valores:

VOLUMENES DE REFERENCIA INDIVIDUALES						
BANDA	SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
GSM - VDF	S1	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
	S2	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
	S3	5,90	0,26	4,48	0,47	0,47
LTE1800 - VDF	S1	6,00	0,24	4,56	0,26	0,26
	S2	6,00	0,24	4,56	0,26	0,26
	S3	6,00	0,24	4,56	0,26	0,26
U2100 - VDF	S1	5,92	0,24	4,43	0,23	0,23
	S2	5,92	0,24	4,43	0,23	0,23
	S3	5,92	0,24	4,43	0,23	0,23
U900 - VDF	S1	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
	S2	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
	S3	6,24	0,28	4,74	0,50	0,50
5G - VDF	S1	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S2	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
	S3	5,98	0,34	0,07	0,66	0,66
U900 - ORG	S1	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
	S2	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
	S3	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
U2100 - ORG	S1	4,34	0,17	3,25	0,17	0,17
	S2	4,34	0,17	3,25	0,17	0,17
	S3	4,34	0,17	3,25	0,17	0,17
L1800 - ORG	S1	4,37	0,17	3,32	0,19	0,19
	S2	4,37	0,17	3,32	0,19	0,19
	S3	4,37	0,17	3,32	0,19	0,19
GSM - ORG	S1	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
	S2	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
	S3	4,63	0,21	3,52	0,37	0,37
LTE800 - ORG	S1	4,69	0,21	3,76	0,40	0,40
	S2	4,69	0,21	3,76	0,40	0,40
	S3	4,69	0,21	3,76	0,40	0,40

Tabla 57: Valores de referencia individuales [elaboración propia]

VOLUMENES DE REFERENCIA COMPUESTOS EQUIVALENTES					
SECTOR	Lm1 (m)	Lm2 (m)	Lh (m)	Lv1 (m)	Lv2 (m)
S1	16,83	0,67	12,47	1,58	1,58
S2	16,83	0,67	12,47	1,58	1,58
S3	16,83	0,67	12,47	1,58	1,58

Tabla 58: Valores de referencia compuestos [elaboración propia]

NOTA: Si la altura (Lv1 + Lv2) del volumen de protección es menor que la altura física de la antena, se ha incluido la altura física.

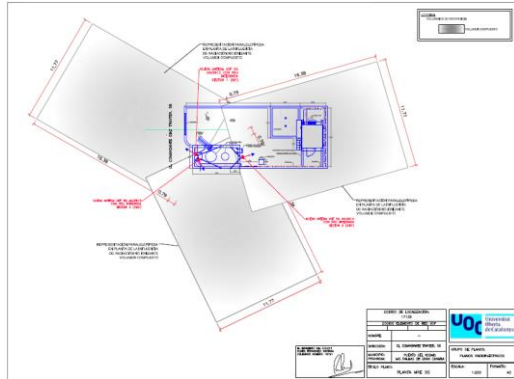
7.6.4.1 Coeficiente de reflexión

Para todos los casos, se ha empleado un coeficiente de reflexión igual a 1 ya que se tratan de entornos outdoor sin obstáculos en la zona más próxima al sistema radiante.

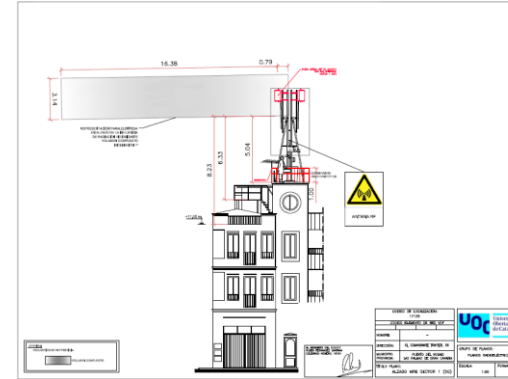
7.7 Planos de planta y alzado, uno para cada sector.

En este apartado representaremos los cálculos descritos anteriormente para cada uno de los emplazamientos existentes en la localidad de Puerto del Rosario con la nueva resectorización plateada, con la finalidad de observar la incidencia de los volúmenes sobre el entorno que rodea al sistema radiante, ya sean personas, la propia cubierta o edificios colidantes.

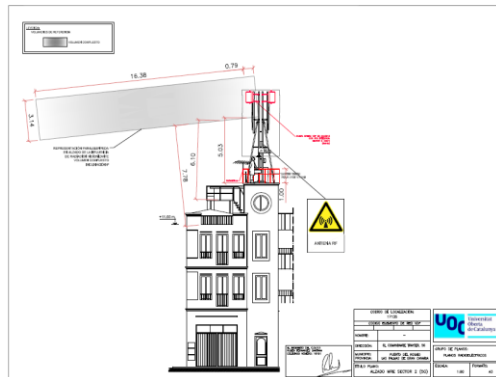
Emplazamiento: Código de Localización 17135



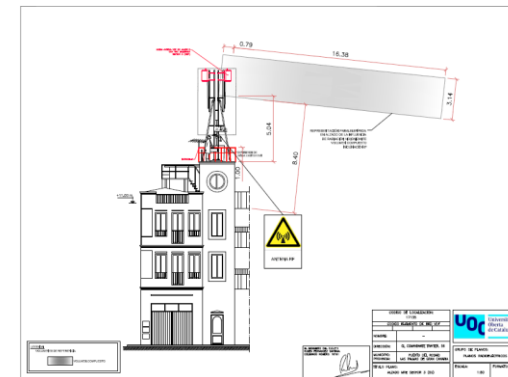
PLANTA_17135



ALZADO SECTOR 1_17135

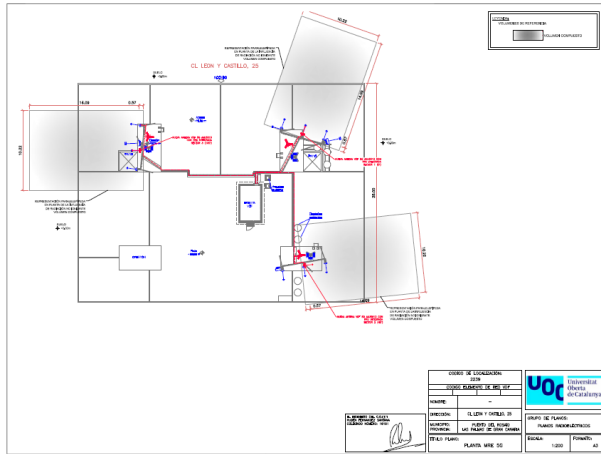


ALZADO SECTOR 2_17135

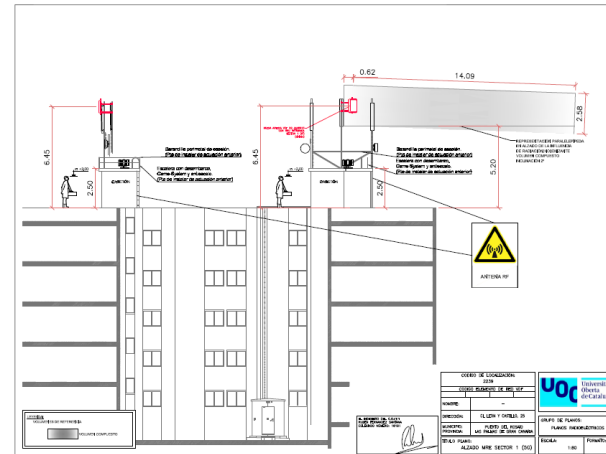


ALZADO SECTOR 3_17135

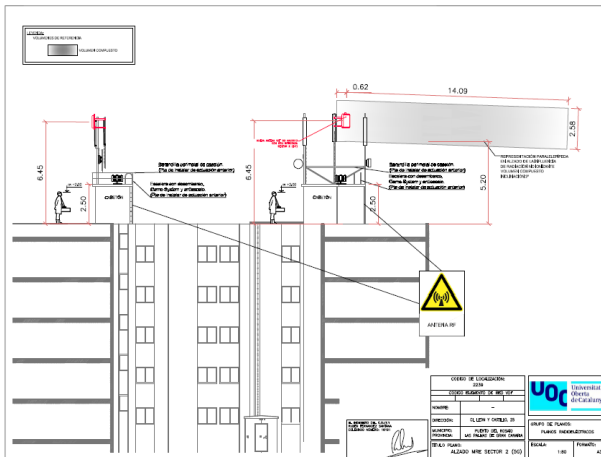
Emplazamiento: Código de Localización 2239



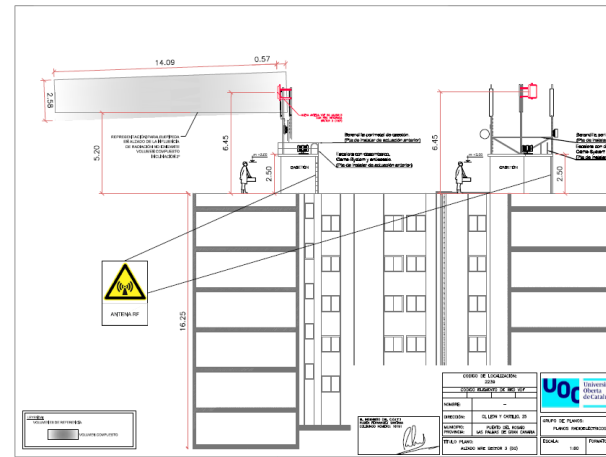
PLANTA_2239



ALZADO SECTOR 1_2239

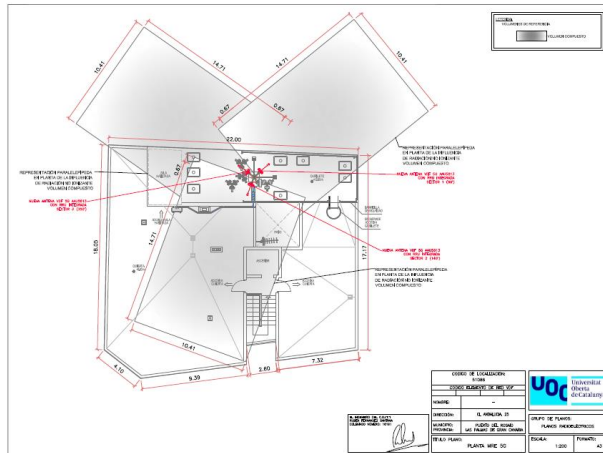


ALZADO SECTOR 2_2239

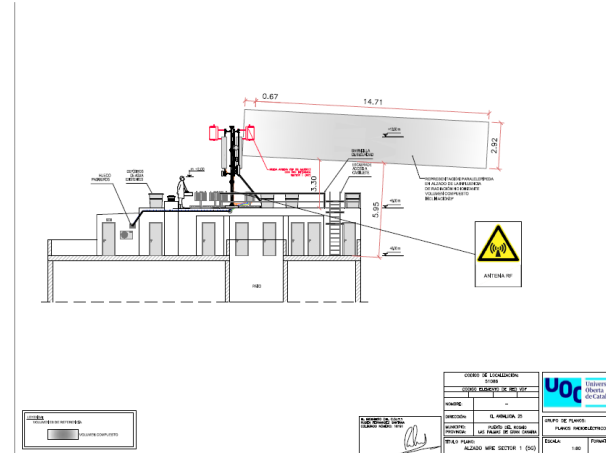


ALZADO SECTOR 3_2239

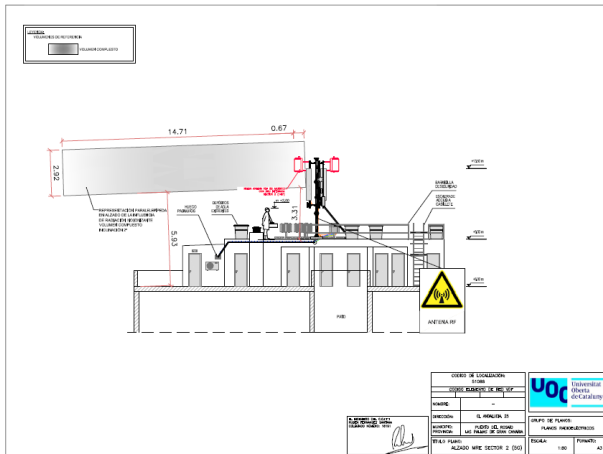
Emplazamiento: Código de Localización 51086



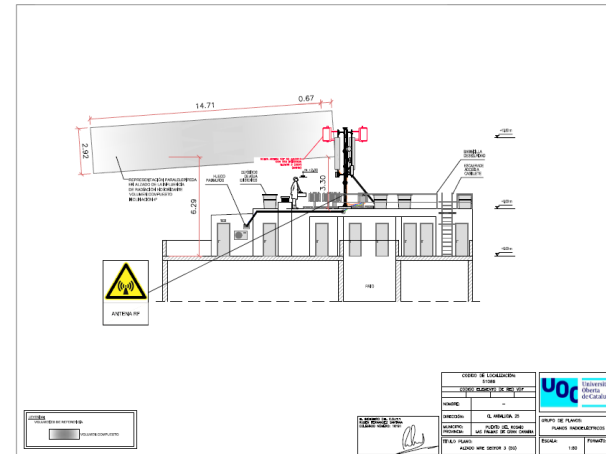
PLANTA_51086



ALZADO SECTOR 1_51086

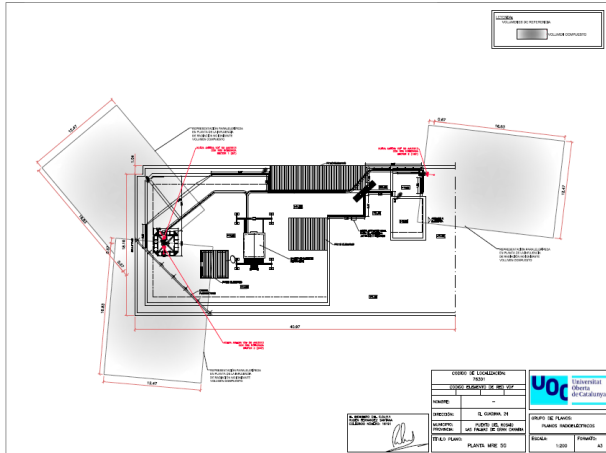


ALZADO SECTOR 2_51086

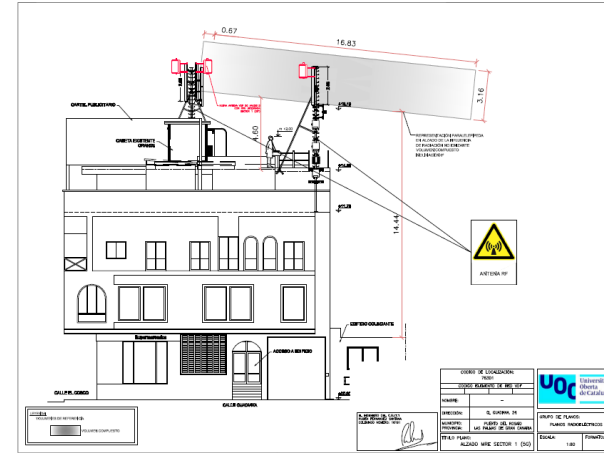


ALZADO SECTOR 3_51086

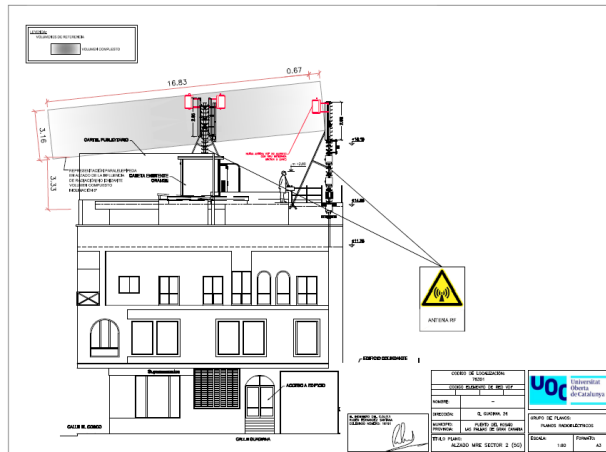
Emplazamiento: Código de Localización 76301



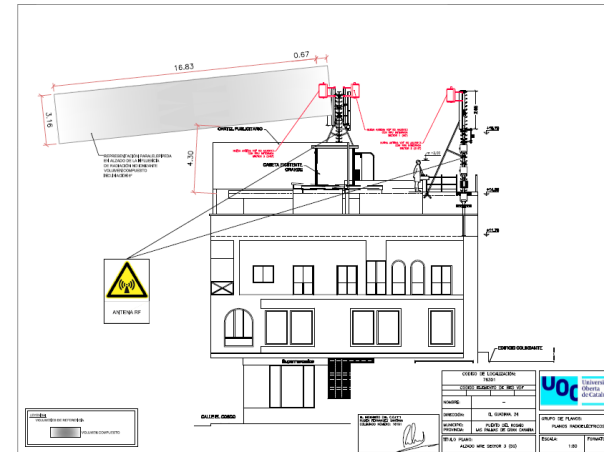
PLANTA_76301



ALZADO SECTOR 1_76301

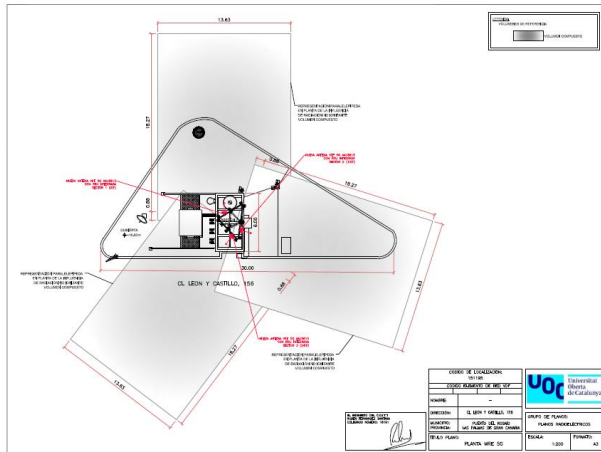


PLANTA_76301

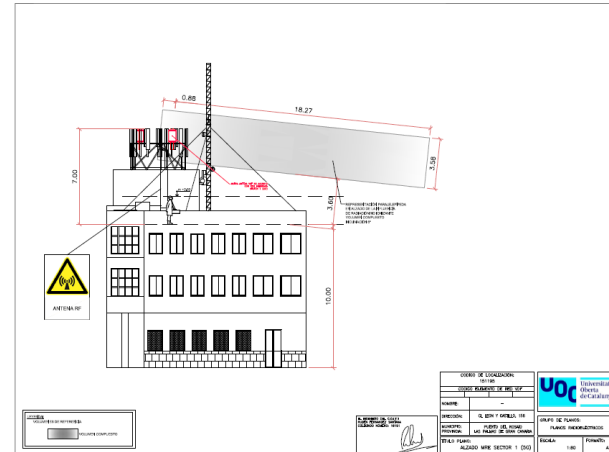


ALZADO SECTOR 1_76301

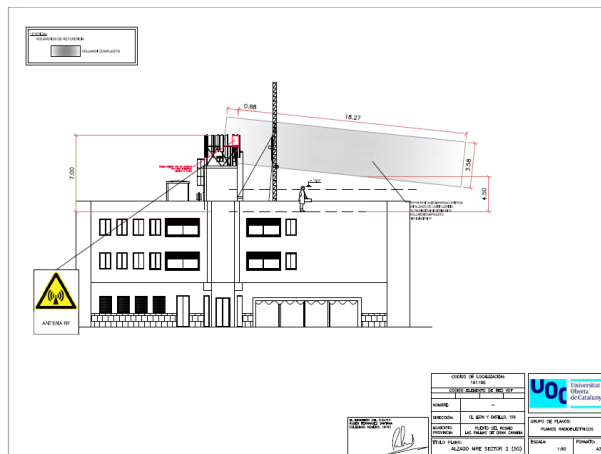
Emplazamiento: Código de Localización 76301



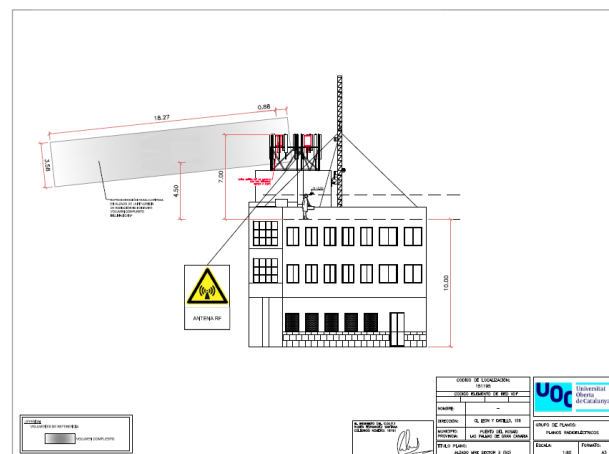
PLANTA_151195



ALZADO SECTOR 1_151195



ALZADO SECTOR 2_151195



ALZADO SECTOR 3_151195

8. Conclusiones vs Abstract

Finalizado el desarrollo de este TFM, podemos sacar varias conclusiones.

Como partida podemos empezar por el capítulo 3, donde podemos decir que la implementación rentable de 5G se basa en la infraestructura 4G existente y que las especificaciones del 3GPP facilitan esta transición de múltiples opciones resumidas en las diferentes secciones del capítulo. La interoperabilidad y el inter funcionamiento entre 4G y 5G es, por lo tanto, una parte elemental de los escenarios de implementación de 5G. La red de radio 5G se puede conectar a un núcleo 4G o 5G. Además, la red de radio 4G también se puede utilizar como parte de la transición. Se le denomina RAN independiente cuando consta únicamente de las respectivas estaciones base 5G, elementos gNB. Las opciones no independientes (NSA) se refieren a la combinación de estaciones base 4G y 5G, donde la opción 3 es uno de los escenarios más prácticos para facilitar las implementaciones no independientes (NSA) denominado arquitectura EN-DC.

El EN-DC utiliza tanto la red de radio LTE como la red central EPC de 4G, lo que significa que los servicios de tipo 5G estarán disponibles sin reemplazar la infraestructura de red. En la arquitectura EN-DC, la infraestructura LTE eNB actúa como una RAN maestra, y la infraestructura 5G NR se puede agregar gradualmente de tal manera que el UE se conecta mediante conectividad dual a LTE y NR.

La principal y más importante a mi respecto ha sido la planificación de cobertura extrapolando los cálculos teóricos a la herramienta XIRIO Online, este aspecto aparte de habernos hecho comprender mejor la tecnología 5G, nos ha dado la clara visión de que uno no puede vivir sin el otro, ya que para poder implementar la red es necesario poner sobre la mesa que es lo que buscamos, como lo buscamos y que tenemos, es decir, partiendo del ejemplo del trabajo, buscábamos aumentar la cobertura de un determinado operador en una zona en concreto y para determinar esa cobertura era necesario conocer una serie de factores que sin ayuda de los cálculos no habría sido tan exacta y partíamos de una red de nodos existente, bajo mi punto de vista y después de haber visto los resultados, bastante pobre, me reafirmo en este aspecto ya que he podido comprobar realmente la red de los otros dos grandes operadores (ver figura 91).

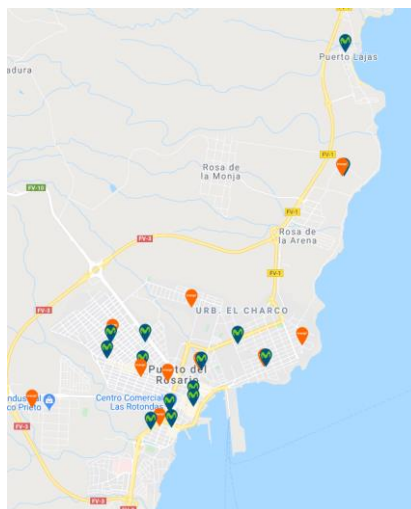


Figura 91: situación operadores [42]

Cierto es, que partíamos de una base con los cálculos teóricos y con ello ya teníamos bastante camino recorrido a la hora de implementar paso a paso la planificación en la herramienta, pero no quiere decir que no nos hayamos encontrado dificultades, como por ejemplo, tener que resectorizar todos los nodos la red existente, uno a uno, para poder encajar los nuevos nodos y que no quedasen zonas huérfanas de señal en zonas donde habitualmente existe la permanencia de personas. También destacar que la familiarización con la herramienta ha llevado su tiempo, al igual que la creación de los nodos y la configuración de sus parámetros.

En cuanto al último capítulo, basado en el cálculo y representación de los paralelepípedos o volúmenes de referencia compuestos, y a pesar de añadir una nueva tecnología y aumentar las dimensiones en cuanto a los Lh1 y Lh2 por la suma cuadrática, los Lv1 y Lv2 por el contrario resultan bastantes pequeños en relación a si representamos los volúmenes con cualquier otra antena que se haya mencionado en el dichos apartados, con lo cual, ese factor está relacionado con el tamaño de la antena utilizada, en este caso, la antena 5G tiene unas dimensiones que no llegan a los 800 cm (ver Anexo) cuando lo más común en emplazamientos de telefonía móvil es ver instaladas antenas del orden de 1,50 m hasta casi los 3 m. También debemos destacar la ubicación de la antena en el emplazamiento, si nos fijamos en los planos, se han colocado a tope de mástil, este aspecto lo están tomando las operadoras, ya que proporciona un mayor campo de visión y permite dar un mayor tilt, aparte de respetar los 2 m que exigen las jefaturas (ver figura en los planos) entre otros factores para dar aprobación a los estudios radioeléctricos y como consecuencia permitir radiar dicha tecnología. Al respetar esa altura que marca el Ministerio, se asegura que las personas que estén en la cubierta o las mismas viviendas no sean afectadas por las emisiones radioeléctricas que radian las antenas.

En cuanto al seguimiento de la planificación debo decir que todo iba en sus tiempos hasta llegar a la herramienta de diseño. Teníamos en mente y ya lo habíamos estudiado y desarrollado en la memoria el uso de la Recomendación UIT-R P.1411 pero al llegar a la herramienta después de haber configurado toda la red, nos dice que aplicar este modelo de propagación conlleva un coste. Así que tuvimos que empezar de nuevo a investigar y estudiar diferentes modelos de propagación acordes a nuestro trabajo y que fuese gratuitos.

A pesar de este contratiempo, en líneas generales, hemos conseguido cumplir el objetivo propuesto, que era dotar de mejor calidad de señal zonas donde ya existía infraestructura del operador aparte de conseguir aumentar la cobertura, llegando a zonas donde realmente no alcanzaba o era inexistente su presencia.

En cuanto a las líneas de futuro que no hemos podido abordar en este trabajo porque no eran el objetivo y además conllevan un coste en la herramienta, son los cálculos de:

- Calcular estadísticas de cobertura
- Cálculo de interferencias
- Calcular estadísticas de interferencia
- Cálculo de capacidad

9. Glosario

1G	Primera generación de comunicaciones móviles; sistemas analógicos
2G	Segunda generación de comunicaciones móviles; sistemas digitales
3G	3G tercera generación de comunicaciones móviles; sistemas con capacidad multimedia
3GPP	Proyecto de asociación de tercera generación
4G	Cuarta generación de móviles
5G	Quinta generación de comunicaciones móviles
AU	Unidad de Aplicación
AUSF	Función del servidor de autenticación
BPSK	Modulación por desplazamiento de fase binaria
BS	Estación Base
BSC	Controlador de estación base
BSM	Mensajes de seguridad básicos
BTS	Estación transceptora base
CA	Agregación de portadores
CP	Plano de control
CP	Prefijo cíclico
CPU	Unidad central de procesamiento
CRC	Verificación de redundancia cíclica
CUPS	Control y separación del plano de usuario
DC	Conectividad Dual
DCI	Información de control de enlace descendente
DL	Enlace descendente
DTF	Transformada de Fourier discreta
DU	Unidad distribuida
E CID	ID de celda mejorada
EAP	Protocolo de autenticación extensible
EC-GSM	Cobertura mejorada EC-GSM
EDGE	Velocidades de datos mejoradas para la evolución global
EE	Eficiencia energética
EIRP	Energía radiada isotrópica efectiva
eMBB	Banda ancha multimedia evolucionada
EMM	Gestión de movilidad EPS
eMTC	Comunicación de tipo máquina evolucionadae
NodeB	Evolución NodeB (eNB)
EPC	Núcleo de paquete evolucionado (4G)
EPS	Sistema de paquetes mejorado
eSIM	Módulo de identidad de suscriptor integrado
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
E-UTRA	Evolucionado UTRA
E-UTRAN	Red de Acceso Evolucionado UMTS
FDD	Dúplex por división de frecuencia
FDM	Multiplexación por división de frecuencia
FEC	Corrección de errores de avance
FF	Factor de forma
FFT	Transformada rápida de Fourier
FR	Rango de frecuencia
GBR	Velocidad de bits garantizada
gNB	5G NodeB
GPRS	Servicio general de radio por paquetes
GPS	Sistema de posicionamiento global
GSM	Sistema global GSM para comunicaciones móviles

GSMA	Asociación GSM
HSPA	Acceso a paquetes de alta velocidad
HSS	Servidor de suscripción
IDFT	Transformada de Fourier discreta inversa
IMS	Subsistema multimedia IP
IMT-2000	Telecomunicaciones móviles internacionales (3G)
IoT	Internet de las cosas
IP	Protocolo de Internet
IPX	Intercambio de paquetes de protocolo de Internet
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
ITU-R	Sector de Radiocomunicaciones ITU
LoS	Línea de visión
LTE	Evolución a largo plazo
LTE-A	LTE avanzado
LTE-M	Modo IoT de LTE
LTE-U	Banda LTE sin licencia
M2M	Máquina a máquina
MAC	Control de acceso medio
MBB	Banda ancha móvil
MBMS	Servicio de multidifusión de difusión multimedia
METIS	Comunicaciones móviles e inalámbricas
MIMO	Entrada múltiple, salida múltiple
mIoT	Internet de las cosas masivas
MM	Gestión de movilidad
MME	Entidad de gestión de movilidad
mMTC	Comunicaciones masivas de tipo máquina
MN	Nodo maestro
MNC	Código de red móvil
MNO	Operador de red móvil
MS	Estación móvil
NF	Función de red
NF	Figura de ruido
NFC	Comunicaciones de campo cercano
NFV	Virtualización de funciones de red
NG-AP	Protocolo de aplicación NG
NG	Próxima Generación
NGC	Núcleo de próxima generación (5G)
NGCN	Red principal de próxima generación
ng-eNB	NodoB evolucionado de próxima generación (eNB 4G mejorado)
NGMN	Redes móviles de próxima generación
NG-RAN	Red de acceso por radio de próxima generación
NLOS	Sin línea de visión
NR	Nueva radio (5G)
OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OFDMA	Acceso OFDMA
PAPR	Relación de potencia pico a promedio
PBCH	Canal de transmisión física
PCF	Función de control de políticas
PCRF	Función de aplicación de la política y el cobro
PDCCH	Canal de control de enlace descendente físico
PDCP	Protocolo de convergencia de datos en paquetes
PDN	Red de datos por paquetes
PDSCH	Canal compartido de enlace descendente físico
PDU	Unidad de paquete de datos
PEI	Identidad permanente del equipo

PFCP	Plano de control de reenvío de paquetes
PFDF	Función de descripciones de flujo de paquetes
P-GW	Puerta de enlace proxy
PRACH	Canal físico de acceso aleatorio
PRS	Señales de referencia de posicionamiento
PSK	Modulación por desplazamiento de fase
PSM	Modo de ahorro de energía
PSS	Señal de sincronización primaria
PTP	Punto a punto
PT-RS	Señales de referencia de seguimiento de fase
PUCCH	Canal de control de enlace ascendente físico
PUSCH	Canal compartido de enlace ascendente físico
QAM	Modulación de amplitud en cuadratura
QCI	Identificador de clase de QoS
QoE	Calidad de experiencia
QoS	Calidad de servicio
QPSK	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura
RAN	Red de acceso por radio
RAT	Tecnología de acceso por radio
RF	Radiofrecuencia
SC-FDM	multiplexor por división de frecuencia de portadora única
SC-FDMA	acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única
SU-MIMO	MIMO de usuario único
TDM	Multiplexación por división de tiempo
TDMA	Acceso múltiple por división de tiempo
UL	Enlace ascendente
UL-CL	Clasificador de enlace ascendente
UMTS	Sistema universal de telecomunicaciones móviles
UP	Plano de usuario
UPF	Función de plano de usuario
URLLC	Comunicaciones de baja latencia ultra confiables

10. Bibliografía

- [1] https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/emisiones_radioelectricas
- [2] <https://xirio-online.com/help/es/index.htm>
- [3] 5G-ppp, European Commission. More than smartphones: White paper shows how 5G will transform EU manufacturing, health, energy, automotive, media & entertainments sectors. Febrero 2016.
- [4] <https://www.lavanguardia.com/tecnologia/20191002/47667791796/tecnologia-5g-redes-futuro-brl.html#:~:text=El%205G%20no%20solo%20ser%C3%A1,cobertura%20del%2099%2C99999%25>
- [5] <https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/244310>
- [6] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11980/fichero/>
- [7] Robles Martínez, Pedro José; Bleda Pérez, Sergio. 'Implementación de un codificador de voz CELP'. Proyecto fin de carrera. Universidad de Alicante (2012).
- [8] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_global_para_las_comunicaciones_móviles
- [9] <https://es.wikipedia.org/wiki/EV-DO>
- [10] Rubén J Fernández Santana. 'The Strategies Associated with The Migration of Networks to 4G'. Proyecto de fin de carrera. University Technical of Lodz (2012).
- [11] Radio Spectrum Policy Group. Strategic Roadmap Towards 5G for Europe. Bruselas, noviembre 2016.
- [12] Manuel Lorenzo, Ericsson España, charla en t3chfest - The Convergence of 5G, AI and IoT
- [13] Ericsson (2016). 5G Radio Access. Ericsson.
- [14] M. Hata, «Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, nº 3, pp. 317 - 325, 1980.
- [15] International Telecommunication Union (ITU), «ITU-R M.2135-1 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced,» Geneva, 2009.
- [16] B. Mondal, T. A. Thomas, E. Visotsky, F. W. Vook, A. Ghosh, Y.-h. Nam, Y. Li, J. Zhang, M. Zhang, Q. Luo, Y. Kakishima y K. Kitao, «3D channel model in 3GPP,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, nº 3, pp. 16 - 23, 2015.
- [17] 5GCM White Paper, «5G Channel Model for bands up to 100 GHz (Version 2.3),» 21 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.5gworkshops.com/5gcm.html>.
- [18] 3rd Generation Partnership Project, «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.3.0 Release 14),» Diciembre 2017. [En línea]. Available: www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm.
- [19] G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, S. Sun y S. Deng, «Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks,» *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2388 - 2424, 2015.
- [20] 3rd Generation Partnership Project, «Study on 3D channel model for LTE (3GPP TR 36.873 version 12.6.0 Release 12),» 26 Septiembre 2017. Available: www.3gpp.org/DynaReport/36873.htm.
- [21] <https://www.ayscom.com/todo-lo-que-necesitas-saber-del-5g/>
- [22] https://www.researchgate.net/publication/269033432_Cell_edge_detection_based_interference_avoidance_scheme_for_closed_mode_LTE_femtocells
- [23] https://www.itu.int/en/ITU-R/space/WRS18space/WRS18-Carrier_to_Interference_Calculations-06122018.pdf
- [24] "Planificación de redes de acceso", Xirio Online. Disponible en https://www.xirio-online.com/help/es/Access_network_planning.html

- [25] "Planificación de redes de transporte", Xirio Online. Disponible en https://www.xirio-online.com/help/es/hop_planning.html
- [26] XIRIO, "Ayuda XIRIO Online Planning Tool. ¿Qué es un estudio?," [Online]. Available: <https://www.xirio-online.com/help/es/studies.html>.
- [27] O. Sallent Roig, J. Valenzuela González, and R. Agusti Comes, Principios de Comunicaciones Móviles, First Edit. Barcelona, 2003.
- [28] 3GPP, "3GPP TR 36.942 V12.0.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 12)." 2014.
- [29] O. Sallent Roig, J. Valenzuela González, and R. Agusti Comes, Principios de Comunicaciones Móviles, First Edit. Barcelona, 2003.
- [30] M. Hernando Rábanos, Comunicaciones Móviles, First Edit. Madrid, 1996.
- [31] "RSRP and RSRQ Measurement in LTE," 2014. [Online]. Available: <http://www.laroccasolutions.com/>.
- [32] XIRIO, "Ayuda XIRIO Planning Tool. Resultado de Mejor Servidor," [Online]. Available: http://www.xirio-online.com/help/es/bs_result.html.
- [33] XIRIO, "Ayuda XIRIO Planning Tool. Resultado de Solapamiento." [Online]. Available: http://www.xirio-online.com/help/es/overlap_result.html.
- [34] <https://www.xataka.com/moviles/5g-asi-es-el-futuro-de-las-redes-moviles>
- [35] <https://www.etsi.org/technologies/mobile/5g>
- [36] Y. Yang, J. Xu, G. Shi y C.-X. Wang, 5G Wireless Systems Simulation and Evaluation Techniques, Ontario: Springer, 2017.
- [37] 3rd Generation Partnership Project, «Discussion on remaining path loss and LOS probability issues (3GPP R1-132895),» 23 Agosto 2013.
- [38] B. Mondal, T. A. Thomas, E. Visotsky, F. W. Vook, A. Ghosh, Y.-h. Nam, Y. Li, J. Zhang, M. Zhang, Q. Luo, Y. Kakishima y K. Kitao, «3D channel model in 3GPP,»
- [39] <https://visor.grafcan.es/visorweb/>
- [40] <http://www.telecomhall.com/es/que-es-tilt-electrico-y-mecanico-de-la-antena-y-como-lo-usa.aspx>
- [41] <http://www.emfexplained.info/spa/?id=25916#5G%20working%20with%204G>
- [42] <https://antenasgsm.com/>
- [43] <http://telefoniamoviltics.blogspot.com/p/omo-funcionan-los-telefonos-celulares.html>
- [44] <http://oa.upm.es/52780/>
- [45] <http://oa.upm.es/44152/>
- [46] <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/16621/418462.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [47] R. Agusti Comes, F. Bernardo Álvarez, F. Casadevall Palacio, R. Ferrús Ferre, J. Pérez Romero, and O. Sallent Roig, LTE - Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. Cataluña, 2010.

11. Anexos

The AAU5613 is an RF module that integrates array antennas and RF units and supports massive MIMO.

- 1.1 Exterior
- 1.2 Ports

1.1 Exterior

Figure 1-1 shows the AAU5613 exterior.

Figure 1-1 AAU5613 exterior



1.2 Ports

Table 1-1 Ports on an AAU

Item	Silkscreen	Description
1	CPRI0	Rate specifications: 25.78125 Gbit/s or 10.3125 Gbit/s
2	CPRI1	Rate specifications: 25.78125 Gbit/s or 10.3125 Gbit/s
3	PWR	-48 V DC power input port

Issue Draft A (2018-03-02) Huawei Proprietary and Confidential Copyright © Huawei Technologies Co., Ltd. 1

2.2 Antenna Electrical Specifications

Table 2-2 Antenna electrical specifications of the AAU5613

Frequency Band (MHz)	3400 to 3600 3600 to 3800
Polarization Mode	-45° and +45°
Gain (dBi)	24
Horizontal Beam Sweeping Range (°)	-60 to 60
Vertical Beam Sweeping Range (°)	-15 to 15
Port Impedance (Ω)	50
Surge Protection	DC grounding

2.3 Mechanical Downtilt Supporting Arm

The adjustment range of the mechanical downtilt supporting arm is -20° to +20°.

2.4 Capacity

Table 2-3 AAU5613 capacity

Frequency Band	Capacity
N78 (3.5 GHz) or N78 (3.7 GHz)	<ul style="list-style-type: none"> • 5G NR: A maximum of five carriers are supported.

2.5 eCPRI Port Specifications

Table 2-4 eCPRI port specifications of the AAU5613

Silkscreen	eCPRI Port Rate (Gbit/s)	eCPRI Topology	Cascading Capability	Maximum Distance from the BBU (km)
CPRI0 or CPRI1	25.78125 or 10.3125	Star or chain topology	3	10

AAU5613 Product Description 3 Technical Specifications

Item	Specifications
Dimensions (H x W x D)	795 mm x 395 mm x 220 mm
Weight	~45 kg (not including mounting kit)

2.11 Environmental Specifications

The following table lists the environmental specifications of the AAU5613.

Table 2-5 Environmental specifications

Item	Specifications
Operating temperature	-40°C to +55°C (without solar radiation)
Operating wind speed	150 km/h
Rated wind velocity	200 km/h
Relative humidity	5% RH to 100% RH
Atmospheric pressure	70 kPa to 106 kPa
Operating environment	The operating environment of the AAU5281 must comply with the following standards: <ul style="list-style-type: none"> • 3GPP TS38.141 • ETSI EN 60919-1-4 V2.2.1 (2014-04) Class 4.1: "Non-weather-protected locations"
Anti-seismic protection	<ul style="list-style-type: none"> • YD5083-1999: Interim Provisions for Test of Anti-seismic Performance of Telecommunication Equipment (telecom industry standard in People's Republic of China) • ETSI EN 60919-2-3 (V2.1 2015-12) • GRES-CORE Issue 4, April 2012, Zone4
Ingress protection (IP) rating	IP65
Surge protection	<ul style="list-style-type: none"> • IEC 62305-1: Protection against lightning - Part 1: General principles • IEC 62305-3: Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard • IEC 62305-4: Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures • ITU-T K.33: Bonding configurations and earthing of remote electronic

2.1 Frequency Band

Table 2-1 AAU5613 frequency band

Frequency Band	Frequency Range	Carrier Bandwidth	IBW	OBW
N78 (3.5 GHz)	3400 MHz to 3600 MHz	40 MHz, 60 MHz, 80 MHz, and 100 MHz	200 MHz	200 MHz
N78 (3.7 GHz)	3600 MHz to 3800 MHz	40 MHz, 60 MHz, 80 MHz, and 100 MHz	200 MHz	200 MHz

2.6 Output Power

Table 2-5 describes the AAU5613 output power.

Table 2-4 AAU5613 output power

Frequency Band	Maximum Total Transmit Power
N78 (3.5 GHz) or N78 (3.7 GHz)	200 W

2.7 Static Sensitivity

Table 2-6 Static sensitivity

Frequency Band	Static Sensitivity
N78 (3.5 GHz) or N78 (3.7 GHz)	TBD

2.8 Power Consumption

Frequency Band	Typical Power Consumption
N78 (3.5 GHz) or N78 (3.7 GHz)	1200W

NOTE

The typical power consumption is measured when the ambient temperature is 25°C and the AAU is 100% loaded. The actual typical power consumption has a 10% deviation from this value.

2.9 Power Supply

The AAU5613 requires -48 V DC power input and has an operating voltage range of -36 V DC to -57 V DC.

2.10 Physical Specifications

The following table lists the physical specifications of the AAU5613.

Table 2-7 Physical specifications of the AAU5613

Item	Specifications
------	----------------

