

Planificación Radio LTE de una red de telefonía móvil en el municipio de Rota

MIGUEL VALLE VALLE

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Directores

Dr. JAUME ANGUERA PROS

Dra. AURORA ANDÚJAR LINARES



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:	PLANIFICACIÓN RADIO LTE DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL EN EL MUNICIPIO DE ROTA
Nombre del autor:	MIGUEL VALLE VALLE
Nombre del consultor/es:	JAUME ANGUERA PROS AURORA ANDÚJAR LINARES
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2016
Área del Trabajo Final:	TECNOLOGÍAS DE ANTENAS
Titulación:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras):

El presente Trabajo Fin de Máster tiene por objetivo diseñar y planificar en todo su conjunto una red de telefonía móvil de 4ª generación en la población de Rota. Para ello, se realiza un análisis teórico en profundidad de la tecnología LTE para posteriormente mostrar las actividades y fases que intervienen en el proceso normal de despliegue de una red. En el diseño de la red se tiene en cuenta los requisitos propios de la tecnología, las diferentes funcionalidades como pueden ser el tráfico de datos o servicios de streaming, los parámetros radio, la elección del equipamiento necesario, etc...

Se plasman las distintas fases del despliegue dependiendo de la inversión prevista, así como la evolución hacia una red madura.

Además, se realiza un plan de despliegue de red para el municipio de Rota debido a que la nueva Ley General de Telecomunicaciones así lo indica para ciertos casos.

Debido a la gran problemática que han causado, la cada vez más habitual presencia de antenas de diversa índole en el panorama de las ciudades y demás entornos, se muestran multitud de soluciones integrales que minimizan el impacto visual que producen este tipo de instalaciones.

Finalmente, se muestran las conclusiones del diseño.

Además, se incluye un anexo con una breve introducción al LTE Advanced y 5G, el Servicio VoIP y el empleo de Femto-nodos en un despliegue de red.

Abstract (in English, 250 words or less):

This Master's Thesis aims to design and plan a whole mobile network of 4th generation in the town of Rota. For this, a theoretical analysis of LTE technology is performed in depth. Later, the activities and phases involved in the normal process of deploying a network, are shown. In the network design it takes into account the specific requirements of the technology, different functionalities such as traffic data or streaming services, the radio parameters, the choice of equipment needed, etc ...

The various stages of deployment depending on the planned investment and the evolution towards a mature network are reflected.

In addition, a network deployment plan for the town of Rota is shown because of the new General Telecommunications Law because it is indicated in certain cases.

Due to the great problems that have caused the increasingly common presence of various types of antennas in the landscape of cities and other environments, numerous solutions that minimize the visual impact that such facilities are presented in this Project.

Finally, the conclusions of the design are shown and it also includes an appendix with a brief introduction to LTE Advanced and 5G, the VoIP service and the use of Femto-nodes in a network deployment.

Palabras clave (entre 4 y 8):

LTE, 4G, DESPLIEGUE, ANTENAS, PLANIFICACIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	9
INTRODUCCIÓN	9
1. Introducción	10
1.1. Contexto y justificación del Trabajo.....	10
1.2. Objetivos del Trabajo	10
1.3. Enfoque y método seguido	10
1.4. Planificación del Trabajo	11
1.5. Breve resumen de productos obtenidos.....	11
1.6. Breve descripción de los capítulos de la memoria	11
Capítulo 2.....	15
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LTE	15
2. Descripción del sistema LTE.....	16
2.1. Introducción a Tecnologías de segunda y tercera generación.....	16
2.1.1. Qué ofrece UMTS respecto a los sistemas de 2G	17
2.1.2. Servicios que ofrece UMTS.....	19
2.1.2.1. HSDPA.....	21
2.1.2.2. HSUPA. Tecnología móvil 3,75G.....	23
2.1.2.3. Cuarta Generación (LTE).....	24
2.1.3. Algunos Conceptos Tecnológicos.....	24
2.1.4 Arquitectura del núcleo de Red UMTS.....	25
2.1.4.1. Introducción.....	25
2.1.4.2. Núcleo de Red	27
2.1.4.3. Red de Acceso Radio	30
2.2. REQUERIMIENTOS DEL LTE	31
2.2.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	32
2.2.1.1.- ARQUITECTURA DE RED	32
2.2.1.2. ASPECTOS DEL INTERFAZ RADIO.....	34
2.2.1.2.1. MODOS DE ACCESO RADIO	34
2.2.1.2.2 BANDAS DE FRECUENCIAS SOPORTADAS	35
2.2.1.2.3 ANCHOS DE BANDA DE TRANSMISIÓN.....	35
2.2.1.2.4 TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE EN EL DOWNLINK: OFDM Y OFDMA.....	36
2.2.1.2.5 TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE EN EL UPLINK: SC-FDMA	37
2.2.1.2.6 MECANISMOS DE ANTENAS AVANZADAS	38
2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE.....	38
2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA.....	38
2.3.2 ENTIDADES DE RED	40
2.3.2.1 UE (USER EQUIPMENT).....	40
2.3.2.2 E-UTRAN Node B (eNodeB).....	41
2.3.2.3 MOBILITY MANAGEMENT ENTITY (MME)	42
2.3.2.4 SERVING GATEWAY (S-GW).....	44
2.3.2.5 PACKET DATA NETWORK GATEWAY (P-GW)	46
2.3.2.6 POLICY AND CHARGING RESOURCE FUNCTION (PCRF)	47
2.3.2.7 HOME SUBSCRIPTION SERVER (HSS)	48
2.3.2.8 DOMINIO DE SERVICIOS.....	48
2.3.3 PRINCIPALES INTERFACES Y PROTOCOLOS LTE.....	49
2.3.4 ARQUITECTURA PARA LA CONEXIÓN DE E-UTRAN CON UNA RED DE ACCESO 3GPP	50
2.3.5 ARQUITECTURA PARA LA CONEXIÓN DE E-UTRAN CON UNA RED DE ACCESO NO-3GPP	51
2.3.5.1 Interconexión con cualquier red de acceso NO-3GPP	51
2.3.5.2 Interconexión con una red de acceso CDMA2000.....	53
2.4. PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS AL INTERFAZ AIRE	54

2.4.1 BÚSQUEDA DE CELDA	54
2.4.2 ACCESO ALEATORIO	55
2.4.3 HYBRID-ARQ (HARQ)	56
2.4.4 TIMING ADVANCE	58
2.4.5 CONTROL DE POTENCIA	59
2.4.6 PAGING (Mecanismo de aviso)	60
2.5. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO (Radio Resource Management RRM)	60
2.5.1 CONTROL DE ADMISIÓN	61
2.5.2 SCHEDULING DE PAQUETES	62
2.5.2.1.- INFORMACIÓN DE CANAL.....	64
2.5.2.2 INFORMACIÓN DE ESTADO DE BUFFER.....	65
2.5.2.3 INFORMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE POTENCIA.....	65
2.5.2.4. ADAPTACIÓN DINÁMICA DEL ENLACE	66
2.5.2.5 ESTRATEGIAS DE SCHEDULING.....	66
2.5.2.6 SCHEDULING SEMI-PERSISTENTE	67
2.5.3 CONTROL DE POTENCIA	68
2.5.4 INTER-CELL INTERFERENCE COORDINATION.....	68
2.5.4.1 INDICADORES DE INTERFERENCIA Y ESTRATEGIAS ICIC EN DOWNLINK.....	70
2.5.4.2 INDICADORES DE INTERFERENCIA Y ESTRATEGIAS ICIC EN UPLINK	71
2.5.5 RECEPCIÓN DISCONTINUA (DRX)	71
2.6. OFDM Y OFDMA	72
2.6.1 INTRODUCCIÓN	72
2.6.2 PROBLEMAS ASOCIADOS A LA PROPAGACIÓN MULTITRAYECTO	73
2.6.3 CONDICIÓN DE ORTOGONALIDAD	76
2.6.4 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER FFT/IFFT.....	79
2.6.4.1 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	81
2.6.4.2 ALGORITMOS RÁPIDOS DE FOURIER	83
2.6.5 TIEMPO DE GUARDA Y PREFIJO CÍCLICO	84
2.6.6 CONSTELACIONES BÁSICAS.....	87
2.6.7 ESQUEMA DE UN SISTEMA OFDM.....	89
2.6.8 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)	90
2.7 SC-FDMA (Single-Carrier FDMA)	93
2.7.1 INTRODUCCIÓN	93
2.7.2 DESCRIPCIÓN DE SC-FDMA.....	95
2.7.3 MODULACIÓN SC-FDMA	96
2.7.4 RESISTENCIA DE SC-FDMA AL MULTICAMINO.....	100
2.8 MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	100
2.8.1 INTRODUCCIÓN	100
2.8.2 DIVERSIDAD	101
2.8.3 DEFINICIÓN DE MIMO.....	102
2.8.4 PRINCIPALES TÉCNICAS DE MIMO.....	103
2.8.4.1 DIVERSIDAD DE ANTENAS	103
2.8.4.1.1 DIVERSIDAD DE RECEPCIÓN	103
2.8.4.1.2 DIVERSIDAD DE TRANSMISIÓN	104
2.8.4.2 MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL (SPATIAL MULTIPLEXING – SM). 106	
2.8.4.3 PRECODING Y BEAMFORMING	107
2.8.5 FUNCIONAMIENTO DE MIMO.....	108
2.8.5.1 PROPAGACIÓN MULTICAMINO. DISTORSIONES DEL CANAL RADIO.....	108
2.8.5.2 FUNCIONAMIENTO DE MIMO.....	110
2.8.6 TIPOS DE MIMO.....	111
2.8.6.1 SU-MIMO (<i>Single-User MIMO</i>)	111

2.8.6.2. MU-MIMO (o <i>Multi-User & Multi-Antenna</i> MIMO).....	111
2.8.7 BREVE DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE MIMO.....	112
2.8.8 BENEFICIOS DE MIMO.....	114
2.9. CAPA FÍSICA DEL INTERFAZ AIRE	115
2.9.1 INTRODUCCIÓN	115
2.9.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN MIMO-OFDM	115
2.9.2.1 MODELO DEL SISTEMA MIMO-OFDM.....	116
2.9.2.1.1 TRANSMISOR	116
2.9.2.1.2 RECEPTOR	116
2.9.3 ESTRUCTURA DE TRAMA.....	117
2.9.3.1 ESTRUCTURA DE TRAMA TIPO 1	117
2.9.3.2 ESTRUCTURA TRAMA TIPO 2.....	118
2.9.3.3 RESOURCE ELEMENT Y RESOURCE BLOCK	119
2.9.4 SEÑALES FÍSICAS.....	122
2.9.4.1 SEÑALES DE REFERENCIA.....	122
2.9.4.2 SEÑALES DE SINCRONIZACIÓN.....	124
Capítulo 3.....	125
EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y ANTENAS EMPLEADAS	125
3. El Proceso de Planificación y antenas empleadas.....	126
3.1. Introducción al proceso	126
3.2. Actividades en el despliegue de red.....	127
3.3. Antenas empleadas	132
Capítulo 4.....	153
PLANIFICACIÓN RADIO LTE DEL MUNICIPIO DE ROTA.....	153
4. Planificación Radio LTE del municipio de Rota.....	154
4.1. Introducción.....	154
4.2. Herramienta de simulación.	154
4.3. Modelos de propagación.....	155
4.4. La ciudad de Rota	158
4.5. Fases de Planificación de la Red LTE	163
4.5.1. Fase 0. Despliegue Inicial LTE.....	164
4.5.2. Fase 1. Densificación en entornos urbanos y extrarradio	173
4.5.3. Fase 2. Subsanción de huecos de cobertura.....	178
4.5.4. Fase 3. Peticiones singulares	188
4.6. Optimización de la red	189
4.6.1. Dimensionado en banda base.....	190
4.6.2. Capacidad de celda	192
4.6.3. Dimensionamiento Radio	195
4.6.3.1. Asignación de recursos radio	196
4.6.3.2. Potencia transmitida.....	196
4.6.3.3. Margen de Interferencia (IM).....	197
4.6.4. Optimización de la red en zonas de alta densidad de eNodos B.	199
4.6.4.1. Importancia del ajuste de inclinaciones y listas de vecinas en LTE	199
4.6.4.1.1. Definición de colindancias.....	199
4.6.4.1.2. Sobrealcances	200
4.6.4.1.3. Polución de pilotos	203
4.6.4.1.4. Frecuencias disponibles para LTE	203
4.6.4.1.5. Necesidad de inclinación variable en zonas de alta densificación	204
4.6.5. Proceso de ajuste de inclinaciones tras la introducción de una nueva Estación Base	204
4.6.5.1. Estimación de la inclinación necesaria en la nueva Estación Base	205
4.6.5.2. Ajuste de inclinaciones en las Estaciones circundantes	205
4.6.6. Herramientas de optimización automáticas	206
Capítulo 5.....	207
PLAN DE DESPLIEGUE DE RED	207
5. Plan de Despliegue de Red	208

5.1. Introducción.....	208
5.2. Plan de Despliegue de Red de Telefonía Móvil de la ciudad de Rota...	209
5.2.1. Antecedentes	209
5.2.1.1. Generalidades.....	209
5.2.1.2. Titularidad	210
5.2.1.3. Descripción de la actividad.....	210
5.2.1.4. Cumplimiento de normas de seguridad y salubridad	210
5.2.1.5. Nueva Ley de Telecomunicaciones 9/2014, de 9 de Mayo	211
5.2.2. OBJETO DEL INFORME	213
5.2.2.1. PRINCIPIOS BASICOS DE UNA RED DE TELEFONIA MOVIL.....	213
5.2.2.1.1. Funcionamiento de una red celular	213
5.2.2.1.2. Fases de despliegue de una red celular	221
5.2.3. INFRAESTRUCTURAS RADIO EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE ROTA: NECESIDADES DE CRECIMIENTO A CORTO Y MEDIO PLAZO.	222
5.2.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA OBJETO DE SERVICIO.....	222
5.2.3.1.1. Descripción de la zona Objeto de Servicio.....	223
5.2.3.1.2. Parámetros de diseño de Red.....	223
5.2.3.1.3. Descripción de la Red Existente	224
5.2.3.2. Justificación de la solución técnica actual.....	224
5.2.4. NECESIDADES DE MEJORA: NUEVAS UBICACIONES DE ESTACIONES BASE	225
5.2.4.1. Clasificación de las diferentes tipologías de futuras ubicaciones....	225
5.2.4.1.1. Tipo 1: Estación Base sobre edificio	225
5.2.4.1.2. Tipo 2: Estación Base sobre suelo.....	232
5.2.4.1.3. Características Radioeléctricas Sistemas Radiantes	238
5.2.4.2. Futuras ubicaciones de Estaciones Base	240
5.2.4.2.1. Rota	241
5.3. Mimetizaciones	243
5.3.1. Torres de bajo impacto	243
5.3.1.1. Antenas expuestas y cableado interior	243
5.3.1.2. Antenas integradas y cableado interior	243
5.3.2. Torres de iluminación.....	250
5.3.3. Diseños singulares.....	253
5.3.4. Mástil sobre bancada autosoportada.	256
5.3.5. Torre Árbol.	259
5.3.6. Radomos en torres.....	262
5.3.7. Mimetizaciones sobre cubiertas.....	263
5.3.8. Ejemplos de montaje.....	268
5.3.9. Soluciones mimetizadas para emplazamientos tipo microcelular.	271
Capítulo 6.....	279
CONCLUSIONES	279
6. Conclusiones	280
6.1. Conclusiones del diseño propuesto	280
ANEXO I FEMTO-NODO	284
ANEXO II VoIP LTE	286
ANEXO III LTE-Advanced. 5G.....	287
Referencias bibliográficas:.....	290
ÍNDICE FIGURAS.....	294
ÍNDICE TABLAS	298

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

El esfuerzo que los operadores están realizando en la modernización de las diferentes redes, desplegando para ello tecnologías de nueva generación para adaptar sus capacidades a las demandas de unos clientes que cada vez utilizan más aplicaciones y sobre todo contenidos más pesados.

Las diferentes actualizaciones de la red de telefonía móvil mediante la tecnología 4G (LTE) es un hecho de gran impacto dada la creciente importancia del móvil en el acceso a Internet.

Las redes de banda ancha, las redes de nueva generación de fibra óptica y LTE se presentan como la solución a la demanda de mayores capacidades.

Por todo ello, el presente trabajo profundiza en la tecnología 4G para adquirir los conocimientos necesarios para un hipotético despliegue de red LTE para un nuevo operador.

1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es el diseño y planificación completa de una red de telefonía móvil de 4ª generación en la población de Rota (29179 habitantes), tanto en el núcleo urbano como en las urbanizaciones periféricas.

En el diseño de la red se tendrán en cuenta una multitud de factores como pueden ser los de la propia tecnología LTE, englobando las diferentes funcionalidades como pueden ser tráfico de datos o servicios de streaming, los diferentes parámetros radio, la elección del equipamiento necesario en función de distintos requerimientos de diseño impuestas por un operador de red móvil y la aplicación de las diferentes herramientas de diseño del mercado o propias.

De este modo, se plasmarán las fases del diseño dependiendo de la inversión inicial prevista y de las funcionalidades demandadas.

Asimismo, se pretende evolucionar una red madura para ampliar el abanico de servicios ofrecidos e implantar mejoras de cobertura de la ciudad.

Además, se propone el desarrollo de soluciones atípicas y reales en lugares en los que por motivos de diversa índole no puede llevarse a cabo una planificación radio acorde a las necesidades de un operador de telecomunicaciones.

1.3. Enfoque y método seguido

El enfoque del presente trabajo es eminentemente práctico debido a que la elaboración del diseño se basa en el despliegue real de una nueva red teniendo en cuenta los principios de actuación de un operador de telefonía móvil.

Para la ejecución de los trabajos se ha realizado una búsqueda de información para la adquisición de los conocimientos teóricos necesarios, se ha investigado el tipo de soluciones de mimetización empleados por los operadores actuales que ha implicado un análisis de la red actual en varios municipios y de varios operadores. Asimismo, se han investigado distintas opciones para el cálculo teórico de los mapas de cobertura y se ha elegido una herramienta propiedad del operador Telefónica de España, llamada URANO.

1.4. Planificación del Trabajo

Para el correcto desarrollo del Trabajo, los distintos recursos necesarios son un ordenador, software de simulaciones teóricas de cobertura, cámara fotográfica, así como acceso a internet para búsqueda de información relacionada.

El cronograma de actividades llevadas a cabo es el que se muestra a continuación:

CAPÍTULO	Observaciones	FECHA INICIO	FECHA FINAL
1. Introducción.	Introducción, Estructura del Proyecto, Metodología de trabajo, Conceptos básicos.	Semana 1	Semana 1
2. Descripción del sistema LTE.	Tecnologías de segunda y tercera generación. Descripción básica de una red LTE. Arquitectura de una red LTE. Interfaz Aire LTE. Distintas tecnología de acceso LTE.	Semana 2	Semana 5
3. El Proceso de Planificación de una red de Telefonía Móvil.	Diseño de una red de telefonía móvil. Fases del proceso de planificación. Tipos de antenas utilizadas en despliegues.	Semana 5	Semana 8
4. Planificación Radio 4G del municipio Rota.	Métodos de cálculo empleados para las simulaciones. Descripción del área de cobertura. Simulaciones.	Semana 8	Semana 12
5. Plan de Implantación.	La Ley General de Telecomunicación incluye la redacción de un Plan de Implantación que refleja el desarrollo de una red de telefonía móvil en un municipio. Dichos planes suelen ser requeridos en municipios de cierta entidad (por encima de 20.000 habitantes), aunque también lo pueden exigir municipios menores.	Semana 12	Semana 16
6. Conclusiones	Comentarios sobre los resultados obtenidos.	Semana 16	Semana 17

Tabla 1. Cronograma de actividades

1.5. Breve resumen de productos obtenidos

Los distintos productos obtenidos son:

- Plan de Implantación para el municipio de Rota.
- Dossier para la minimización del impacto visual. Mimetización de antenas reales y/o fotomontajes.
- Simulación de coberturas teóricas en el municipio de Rota.

1.6. Breve descripción de los capítulos de la memoria

El capítulo 2 tiene por objetivo el dar una idea completa del funcionamiento del sistema LTE. Por ello, se presentan las tecnologías de segunda y tercera generación exponiendo los aspectos más importantes para sistemas de tercera

generación y a continuación se plantean las principales características de la tecnología LTE.

Se realiza una introducción de la arquitectura de red del sistema, mencionando las características del interfaz radio, así como de los distintos interfaces de la red. A continuación se expone cómo se gestionan los recursos radio por medio del control de acceso, control de potencia e incluso la asignación de recursos. Posteriormente, se explica el funcionamiento de la modulación OFDM y OFDMA, así como la modulación del enlace ascendente SC-FDMA.

Seguidamente se describe el sistema MIMO, donde se muestran las ventajas, los diferentes aspectos de la diversidad y las principales técnicas utilizadas, como son la multiplexación espacial y la diversidad de antenas. Se expone, por tanto, el funcionamiento del MIMO aplicado a la tecnología de cuarta generación.

Por último, se introduce la capa física del interfaz aire donde se explica el modelo de sistema MIMO-OFDM, se muestran los transmisores y receptores del sistema y donde podemos ver la estructura de la trama. Asimismo, se exponen las señales físicas y cómo se asignan los recursos radio.

En el capítulo 3, se realiza una breve descripción del proceso de despliegue de una red. El inicio de una red se basa en objetivos comerciales basados en un plan de negocio, una estimación de demanda, peticiones singulares y a su vez está muy influido por el presupuesto económico de partida.

Además, en dicho capítulo, se muestran los distintos pasos que conllevan el despliegue de red, desde la decisión inicial, pasando por la contratación de los puntos óptimos, hasta la puesta en servicio.

Una vez decidido el objetivo de cobertura y las áreas poblacionales, los Ingenieros Radio LTE se centran en el diseño del Plan nominal de cada una de las ciudades o vías de comunicación.

En el capítulo 4 se diseña una red celular de Telefonía Móvil LTE para la ciudad de Rota. Se tendrá en cuenta el proceso de planificación descrito en el capítulo 3 y las particularidades de la ciudad.

Se realizan distintas simulaciones que se emplean para el cálculo teórico de coberturas empleando para ello herramientas especialmente diseñadas basadas en los distintos modelos de propagación. Se realizan simulaciones en entornos con cartografía 3D y en zonas que no disponen de las mismas.

Se resumen las principales características de la aplicación y con posterioridad se entra en detalle de la red propuesta dividida por fases.

En el capítulo 5 se hace una breve mención de la nueva Ley de General de Telecomunicaciones que tiene como principal objetivo fomentar la inversión y simplificar el despliegue.

Además, para ciertos casos se requiere de un Plan de Implantación que defina el despliegue futuro de un operador para un municipio concreto. Por ello, se plasma un modelo de Plan de despliegue para el municipio de Rota, teniendo en cuenta las simulaciones realizadas en el capítulo cuarto.

Asimismo, se muestra de forma gráfica un sinnúmero de soluciones integrales de bajo impacto visual.

En el capítulo sexto se muestran las principales conclusiones así como los avances tecnológicos de la red 4G. Además, se hace una introducción al Servicio de VoIP en redes LTE y una mención al 5G.

Capítulo 2

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LTE

2. Descripción del sistema LTE

El presente capítulo tiene por objetivo el dar una idea completa del funcionamiento del sistema LTE. Por ello, se hace una introducción de las tecnologías de segunda y tercera generación exponiendo los aspectos más importantes para sistemas de tercera generación y a continuación se plantean las principales características de la tecnología LTE.

Se realiza una introducción de la arquitectura de red del sistema, mencionando las características del interfaz radio, así como de los distintos interfaces de la red. A continuación se expone cómo se gestionan los recursos radio por medio del control de acceso, control de potencia e incluso la asignación de recursos. Posteriormente, se explica el funcionamiento de la modulación OFDM y OFDMA, así como la modulación del enlace ascendente SC-FDMA.

A continuación se hace una introducción al MIMO, donde se muestran las ventajas, los diferentes aspectos de la diversidad y las principales técnicas utilizadas, como son la multiplexación espacial y la diversidad de antenas. Se expone, por tanto, el funcionamiento del MIMO aplicado a la tecnología de cuarta generación.

Por último, se introduce la capa física del interfaz aire donde se explica el modelo de sistema MIMO-OFDM, se muestran los transmisores y receptores del sistema y donde podemos ver la estructura de la trama. Asimismo, se exponen las señales físicas y cómo se asignan los recursos radio.

2.1. Introducción a Tecnologías de segunda y tercera generación

Antes de entrar a ver qué es UMTS, se debe considerar un concepto mucho más amplio que es el de la llamada "familia IMT-2000". IMT-2000 es el resultado del trabajo desarrollado por ITU con objeto de definir los requisitos que deberían cumplir los sistemas de tercera generación que constituirían la evolución de los actuales sistemas digitales de segunda generación (GSM, cdmaone, D-AMPS...). Entre estos requisitos se establecía la transmisión de datos a alta velocidad, alta capacidad de tráfico, interoperabilidad entre diferentes redes y tecnologías, terminales de alta calidad y bajo precio [1], etc...

ITU no estableció cuáles deberían ser las tecnologías que se desarrollaran para cumplir con estos requisitos, y por tanto, dentro del concepto IMT-2000 cabe cualquier sistema de telefonía celular que cumpla los requisitos de la ITU para sistemas de tercera generación. El conjunto de los diferentes sistemas que cumplen estos requisitos se ha dado en llamar "familia IMT-2000".

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es uno de los principales sistemas que integran la familia IMT-2000. ETSI ha llevado a cabo su propio proceso de estandarización consistente en aplicar los conceptos generales de IMT-2000 (sistemas de alta capacidad y elevadas velocidades de transmisión de datos) a un sistema concreto (UMTS) y proporcionando estándares a mayor nivel de detalle que permitan su posterior implantación en los productos de los diversos fabricantes.

Desde este punto de vista, UMTS no es más que otro integrante de la familia IMT-2000, pero dado que es el estándar que seguirán las operadoras europeas y teniendo en cuenta que éstas evolucionan desde redes GSM de alto nivel de penetración, es posiblemente el sistema de mayor impacto en las redes IMT-2000.

El sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* ó Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), es la propuesta europea de tecnología de red de comunicaciones móviles de Tercera Generación (3G), que cumpliendo con los requisitos técnicos de la IMT-2000⁽¹⁾, se ha diseñado para un escenario de la Sociedad de la Información en el que destacarán los servicios de comunicaciones personales entre seres humanos, con independencia de su ubicación geográfica, terminal utilizado y medio de transmisión empleado.

2.1.1. Qué ofrece UMTS respecto a los sistemas de 2G

El éxito del sistema GSM dentro del mundo de las comunicaciones celulares no tiene precedente. En Europa la penetración se sitúa en torno al 99% de la población.

Sin embargo, la popularidad del teléfono móvil GSM no se refleja en su uso como herramienta de transmisión de datos. En este ámbito la penetración del tráfico de datos respecto al tráfico total se sitúa en torno al 10%.

Las razones de este aparente fracaso del sistema GSM para satisfacer las necesidades de transmisión de datos de los clientes son sin duda varias:

- Bajas velocidades de transmisión (max. 9600 bit/s).
- Aplicaciones poco intuitivas para el uso de profanos al sector.
- Escasa oferta de servicios basados en transmisión de datos.

Sin embargo, si observamos la evolución del tráfico de datos de las operadoras fijas nos daremos cuenta de que su crecimiento es prácticamente exponencial en los últimos años, debido fundamentalmente al tráfico de Internet. Evidentemente, esto es debido a que la Red Fija ofrece un medio de transporte al tráfico de Internet que el usuario considera al menos adecuado (dispositivo de entrada / salida, velocidad, contenidos...).

¿Sería factible desarrollar una nueva generación de teléfonos móviles con unas características atractivas al usuario de Internet y en general, adecuados a la transmisión de datos de alta velocidad?

Los sistemas de Tercera Generación pretenden dar una respuesta afirmativa a esta pregunta y con ello propiciar un aumento de tráfico de datos en el entorno de las comunicaciones móviles similar al experimentado en Redes Fijas.

De hecho, el tráfico de datos 3G se ha duplicado en el último año, lo que hace que las inversiones de las distintas operadoras se centren en esta tecnología.

UMTS representa por tanto una evolución respecto a los sistemas de 2G, ofreciendo:

- Velocidades de Transmisión de hasta 14,4 Mbit/s (terminal estático o con reducida movilidad).
- Velocidades de Transmisión de 7,2 Kbit/s con movilidad limitada.
- Terminales sencillos de usar, a precio asequible, con *displays* de alta calidad.
- Conectividad a Redes de Datos a cualquier hora y durante tiempo indefinido. El usuario pagará por el volumen de datos transmitido pero no por el tiempo de la conexión.
- Posibilidad de asignar diferentes anchos de banda en el '*uplink*' y en el '*downlink*' dependiendo del tipo de tráfico intercambiado.
- Accesibilidad a todos los servicios contratados con el operador desde cualquier otra red ('Roaming'). Este es el concepto de VHE (*Virtual Home Environment*) según el cual el cliente debe tener la impresión de estar siempre en su casa, aunque se encuentre en otra red diferente; es decir, debe poder acceder a todo su paquete de opciones sin notar ninguna modificación ni en el mecanismo de acceso ni en las prestaciones.
- Los terminales serán multibanda y multimodo. Esto quiere decir que un usuario podrá conectarse a la red UMTS o a la red GSM dependiendo de la capacidad de transporte que necesite o de la cobertura que obtenga de cada una de ellas; del mismo modo podrán conectarse a redes de otras tecnologías (p.ej. la americana CDMAone (2G) y CDMA2000 (3G)).
- Sustentación de una amplia variedad de servicios y aplicaciones en entornos móviles.
- Permitir la implantación de servicios definidos por proveedores de servicios con independencia de la red de soporte.
- Proporcionar servicios con terminales móviles, transportables o portátiles en todos los entornos radio.
- Presentación unificada de servicios a los usuarios.
- Introducción flexible de nuevas facilidades y servicios multimedia y de carácter asimétrico.
- Velocidad flexible, asignable por demanda.
- Calidades de servicio negociables, iguales o superiores a las de las redes móviles de Segunda Generación.
- Compatibilidad con GSM para facilitar un funcionamiento coordinado GSM/UMTS en la primera etapa del despliegue UMTS, con terminales duales de itinerancia y traspaso entre ambas redes.
- Eficiencia espectral.
- Carácter abierto de la norma de favorecer la interoperabilidad entre equipos y terminales, de forma que los usuarios puedan beneficiarse de las economías de escala y los operadores obtengan ventajas del entorno multiproveedor.

En implementaciones prácticas es muy posible que los usuarios de UMTS sean incapaces de acceder a la red a las velocidades más altas y en cualquier momento. Por ejemplo, en caso de congestión en determinada área, la red sólo

soportará transmisiones a velocidades más bajas. Es por tanto una necesidad que los terminales se adapten a la disponibilidad de diferentes velocidades de transmisión y diferentes calidades de servicio (QoS).

Los terminales UMTS, además de poder operar también en redes GSM, es de esperar que sean capaces de funcionar también en redes de otros sistemas de la familia IMT-2000. De esta forma se conseguiría prestar al usuario un auténtico servicio de 'roaming' global. Incluso es posible pensar en terminales que puedan además funcionar con sistemas de satélite, de forma que el sistema tendría realmente una cobertura global.

Para conseguir alcanzar los objetivos de capacidad y calidad pretendidos en UMTS se adoptó para el acceso radio la tecnología CDMA de banda ancha: W-CDMA.

La fuerza impulsora del Sistema UMTS han sido, por un lado el éxito del sistema GSM, que ha comenzado a saturar los recursos radio disponibles y por otro, el desarrollo de Internet.

Para la especificación de la norma se constituyó el 3GPP (*3rd Generation Project Partnership*), que comprende los organismos de estandarización: ETSI, ARIB (*Association of Radio Industries*) y TTC (*Telecommunications Technology Committee*) de Japón; T1 de Estados Unidos; TTA (*Telecommunications Technology Association*) de Corea y CCSA.

Se muestra a continuación el mapa

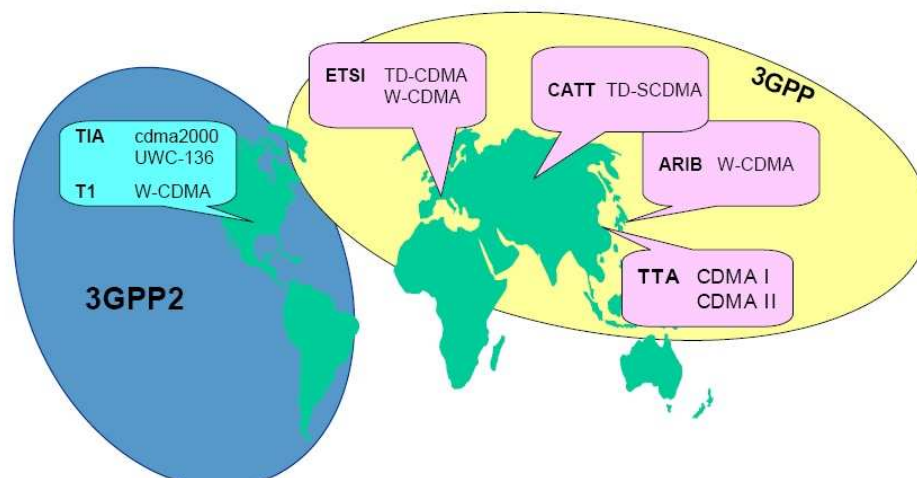


Figura 1. Mapa de foros de estandarización en el mundo

2.1.2. Servicios que ofrece UMTS

En la norma UMTS se ha procurado evitar la excesiva especificación de servicios como sucedió en GSM, en aras de favorecer, por un lado la competitividad entre operadores y por otro la introducción de proveedores de servicios no propietarios de red.

En consecuencia, se ha pretendido especificar únicamente los mecanismos básicos para constituir los servicios, dejando que sea el mercado quien actúe como definidor e impulsor de nuevos servicios.

Con independencia de la flexibilidad citada, con el fin de establecer las políticas de acceso, negociación y calidad de prestación de los servicios, para la signación de los recursos de radio y red necesarios y de conformidad con las categorías

definidas por la UIT para los sistemas IMT-2000, se clasifican los servicios en cuatro grandes grupos:

- 1) Servicios conversacionales (*Conversational services*). Servicios en tiempo real, generalmente bidireccionales y con estrictas limitaciones en cuanto a retardos, que deben ser pequeños y constantes. Como ejemplos pueden citarse los servicios de voz, videotelefonía o videojuegos.
- 2) Servicios afluentes (*Streaming services*). Servicios unidireccionales con secuencias de información vocal o de video. Los retardos deben ser constantes, pero no necesariamente reducidos. Un ejemplo de estos servicios puede ser el visionado de una película.
- 3) Servicios interactivos (*Interactive services*). Servicios bidireccionales con intercambio de información entre seres humanos, hombre-máquina o entre dispositivos. Ha de preservarse una baja tasa de errores y el retardo no debe ser excesivo. Empleos, la navegación web o consulta de bases de datos vía UMTS.
- 4) Servicios diferidos (*Background services*). Comprenden conexiones de un usuario humano o un dispositivo en las cuales se envían o reciben archivos de datos en segundo plano. Como ejemplos pueden indicarse el correo electrónico, los mensajes cortos o la descarga desde bases de datos.

En terminología UMTS se clasifican también, por su retardo, los servicios en:

- 1) LDD (*Low Delay Data*), con retardo máximo de 50 ms para comunicaciones con conmutación de circuitos.
- 2) LCD (*Long Constrained Data*), con retardo máximo de 300 ms para comunicaciones con conmutación de circuitos.
- 3) UDD (*Unconstrained Delay Data*), para conmutación de paquetes.

UMTS es una tecnología apropiada para una gran variedad de usuarios y tipos de servicios y no solamente para usuarios muy avanzados, ofrece:

- Facilidad de uso y bajo coste: UMTS proporcionará servicios de uso fácil y adaptable para abordar las necesidades y preferencias de los usuarios, amplia gama de terminales para realizar fácil acceso a los distintos servicios y bajo coste de los servicios para asegurar un mercado masivo.
- Nuevos y mejorados servicios: Los servicios vocales mantendrán una posición dominante durante varios años. Los usuarios exigen a UMTS servicios de voz de alta calidad junto con servicios de datos e información. Las proyecciones muestran una base de abonados de servicios multimedia en fuerte crecimiento durante el próximo trienio desde el año 2010 al 2012, lo que posibilita también servicios multimedia de alta calidad en áreas carentes de estas posibilidades en las redes fijas cableadas, como pueden ser zonas de difícil acceso.
- Acceso rápido: La principal ventaja de UMTS sobre la segunda generación móvil (2G ó GSM y GSM1800 ó DCS, en España), es la capacidad de soportar altas velocidades de transmisión de datos, en función de los códigos asignados y de la movilidad del terminal o de la categoría del mismo.
- Transmisión de paquetes de datos y velocidad de transferencia de datos a pedido: UMTS ofrece la transmisión de datos en paquetes y por circuitos de

conmutación de alta velocidad debido a la conectividad virtual a la red en todo momento y a las formas de facturación alternativas (por ejemplo, pago por byte, por sesión, tarifa plana, ancho de banda asimétrico de enlace ascendente / descendente) según lo requieran los variados servicios de transmisión de datos que están haciendo su aparición.

- Entorno de servicios amigable y consistente: Los servicios UMTS se basan en capacidades comunes en todos los entornos de usuarios y radioeléctricos de UMTS. Al hacer uso de la capacidad de roaming desde su red hacia la de otros operadores UMTS, un abonado particular experimentará así un conjunto consistente de sensaciones como si estuviera en su propia red local (Entorno de Hogar Virtual ó VHE). VHE asegurará la entrega de todo el entorno del proveedor de servicios, incluyendo por ejemplo, el entorno de trabajo virtual de un usuario corporativo, independientemente de la ubicación o modo de acceso del usuario (por satélite o terrestre). Asimismo, VHE permitirá a las terminales gestionar funcionalidades con la red visitada, posiblemente mediante una bajada de software, y se proveerán servicios del tipo "como en casa" con absoluta seguridad y transparencia a través de una mezcla de accesos y redes principales.
- Las mejoras introducidas por UMTS, HSDPA y HSUPA se pueden utilizar sobre todo en zonas donde las condiciones de propagación sean óptimas o en sistemas de cobertura de interiores. Las velocidades de transmisión de datos esperados para 2010 rondan los 14,4 Mbps en el enlace descendente y de hasta 3,6 Mbps para el enlace ascendente [2].

Asimismo, se enumeran a continuación una gran variedad de servicios ofrecidos por el sistema UMTS: videotelefonía, videoconferencia, video bajo demanda, audio bajo demanda, servicios afluentes de audio y video, descarga de imágenes, difusión de radio y televisión, juegos, mensajería multimedia, navegación mediante voz, chat, servicios de información, tele-enseñanza, transacciones electrónicas, banca móvil, medios de pago, servicios de entorno personal, servicios orientados a empresas con redes privadas virtuales, servicios de telemando, telemedia y telecontrol, control de flotas, etc.

2.1.2.1. HSDPA

La tecnología HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*: acceso descendente de paquetes a alta velocidad) es la optimización de la tecnología espectral UMTS/WCDMA, incluidas en las especificaciones 3GPP *Release 5* y consiste en un nuevo canal compartido en el enlace descendente que mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información hasta alcanzar tasas de 14 Mbps, en la actualidad, aunque se espera que en los próximos meses se vea incrementada considerablemente.

Es la evolución de la tercera generación, conocida con 3,5G, y se considera el paso previo antes de la cuarta generación (4G), la futura integración de redes.

Es totalmente compatible en sentido inverso con WCDMA y aplicaciones ricas en multimedia desarrolladas para WCDMA funcionarán para HSDPA. En España, todos los proveedores UMTS dan soporte a HSDPA.

HSDPA lleva a las redes WCDMA a su máximo potencial en la prestación de servicios de banda ancha, mediante un aumento en la capacidad de datos

celulares, con un *throughput* más elevado. De la misma manera en que UMTS incrementa la eficiencia espectral en comparación con GPRS, HSDPA incrementa la eficiencia espectral en comparación con WCDMA. La eficiencia espectral y las velocidades aumentadas no sólo habilitan nuevas clases de aplicaciones, sino que además permite que la red sea utilizada simultáneamente por un número mayor de usuarios; HSDPA provee tres veces más capacidad que WCDMA. En cuanto a la interfaz de las aplicaciones en tiempo real tales como videoconferencia y juegos entre múltiples jugadores, actualiza a la tecnología WCDMA al acortar la latencia de la red (se prevén menos de 100 ms.), brindando así mejores tiempos de respuesta.

Alcanza sus altas tasas de velocidad gracias al agregado de modulación de mayor orden (Modulación de Amplitud de Cuadratura 16 – 16QAM), codificación variable de errores y redundancia incremental, así como la introducción de nuevas y potentes técnicas tales como programación rápida. Además, HSDPA emplea un mecanismo eficiente de programación para determinar qué usuario obtendrá recursos. Están programadas varias optimizaciones para HSDPA que aumentarán aún más las capacidades UMTS/HSDPA, comenzando con un enlace ascendente optimizado (HSUPA), receptores avanzados y antenas inteligentes.

HSDPA utiliza los siguientes canales:

- En el *Downlink*:
 - ✓ HS-PDSCH (*High Speed - Physical Downlink Shared Channel*): es el canal donde se lleva el tráfico. Es un canal compartido entre varios usuarios. Su SF es 16 (el mismo que el del RAB de 128).
 - ✓ HS-SCCH (*High Speed - Shared Control Channel*): es un canal de señalización, asociado al HS-PDSCH. Hay un HS-SCCH por cada usuario. Su SF es 128.
- En el *Uplink*:
 - ✓ Para el transporte de datos no existen canales compartidos, sino que se asigna un DCH como los canales de R99 (*Release 99*). Se soportan los RAB's de 16, 64, 128 y de 384 kbit/s en UL.
 - ✓ También existe un canal dedicado HS-DPCCH (*High Speed - Dedicated Physical Control Channel*), de SF=256, que soporta la señalización HARQ y el envío del CQI desde el móvil a la estación base.

La velocidad máxima alcanzable por una conexión de datos HSDPA depende del número de canales (códigos) asignados a esa conexión así como de la codificación de los mismos (MCS). La codificación que se utiliza depende de las condiciones radio. Los MCS con números más bajos se utilizan para peores condiciones radio. A partir de MCS5, es necesaria la modulación 16 QAM. Las cifras de velocidad son las siguientes:

Codificación	MCS1	MCS2	MCS3	MCS4	MCS5	MCS6	MCS7
Modulación	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	16 QAM	16 QAM	16 QAM
Throughput/código	172	250	342	420	510	588	680

Tabla 2. Throughput por código

Así pues, con QPSK, la capacidad máxima teórica de un canal (código) HS-PDSCH es 420 kbit/s. No obstante, en un entorno radio real, y en baja carga, la

capacidad típica de un canal es de 320 kbit/s. Esto implica que la capacidad de tráfico de una célula con 5 códigos QPSK es de $5 * 320 = 1,6$ Mbit/s.

Con 16QAM, la capacidad teórica con 5 códigos sería de 3,6 Mbit/s, aunque las cifras reales están en torno a 3 Mbit/s.

A medida que el tráfico HSDPA aumenta, las condiciones radio empeorarán, y se producirán también más colisiones entre los usuarios por el uso de los canales. Existen simulaciones a nivel de sistema, en las que se representa la capacidad de un canal HS-PDSCH en función de la carga.

Los terminales HSDPA disponibles actualmente en el mercado caen dentro de una de estas 5 categorías (se listan en orden de antigüedad, de terminales más antiguos a más nuevos):

Categoría UE	Nº Códigos HSDPA	Modulación soportada	Throughput máximo teórico (Interfaz Aire)	Funcionalidad es requeridas
Categoría 12	5	QPSK	1,8 Mbit/s	-
Categoría 6	5	16QAM	3,6 Mbit/s	-
Categoría 7/8	10	16QAM	7,2 Mbit/s	HSDPA 15 Codes
Categoría 9	15	16QAM	10.1 Mbit/s	HSDPA 15 Codes & HSDPA 10 Mbps per User
Categoría 10	15	16QAM	14,0 Mbit/s	-

Tabla 3. Categorías de terminales

Es importante señalar que los códigos que se asignen a HSDPA quedan reservados para este tipo de conexiones, no pudiendo ser utilizados para conexiones R99. Por ello, al asignar canales para HS-PDSCH, se está inutilizando parte del árbol de códigos para tráfico R99.

2.1.2.2. HSUPA. Tecnología móvil 3,75G

HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*) es un protocolo de acceso de datos para redes de telefonía móvil con alta tasa de transferencia de subida (de hasta 5,76 Mbps). Calificado como generación 3,75G es una evolución del HSDPA (nombrado popularmente como 3,5G). La solución HSUPA potencia inicialmente la conexión del enlace ascendente UMTS/WCDMA.

HSUPA está definido en *Universal Mobile Telecommunications System Release 6* estándar publicado por 3GPP, como la tecnología que ofrece una mejora sustancial en la velocidad para el tramo de subida, desde el terminal hacia la red.

HSDPA y HSUPA ofrecen altas prestaciones de voz y datos y permitirá la creación de un gran mercado de IP multimedia móvil. HSUPA mejora las aplicaciones de datos avanzados persona a persona, con mayores y simétricos ratios de datos, como el e-mail en el móvil y juegos en tiempo real contra otro jugador. Las aplicaciones tradicionales de negocios, junto con muchas aplicaciones de consumidores, se benefician del incremento de velocidad de conexión.

A continuación se muestra la previsión de las diferentes *Releases*:

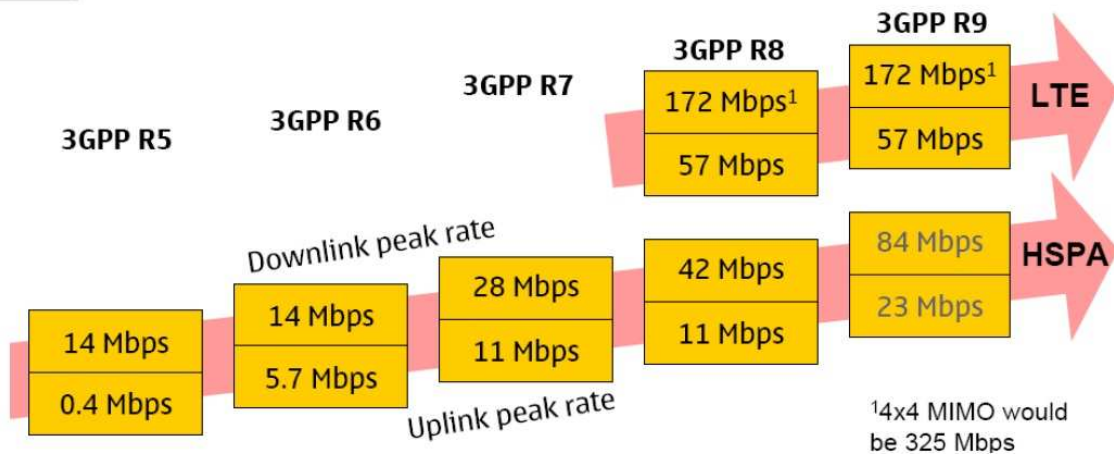


Figura 2. Evolución velocidad pico según distintos Releases

2.1.2.3. Cuarta Generación (LTE)

La cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil estará basada en IP siendo un sistema de sistemas y una red de redes, alcanzándose después de la convergencia entre las redes de cables e inalámbricas así como de ordenadores, dispositivos eléctricos y en tecnologías de la información así como en otras convergencias para proveer velocidades de acceso entre 100 Mbps en movimiento y 1Gbps en reposo, manteniendo una calidad de servicio (QoS) de punta a punta (end-to-end) de alta seguridad para permitir ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento o lugar con el mínimo de coste posible.

El WWRF (Wireless World Research Forum) define 4G como una red que funcione en la tecnología de Internet, combinándola con otros usos y tecnologías tales como Wi-Fi y WiMax. La 4G no es una tecnología o estándar definido, sino una colección de tecnologías y protocolos para permitir el máximo rendimiento de procesamiento con la red inalámbrica más barata.

En Japón ya se ha experimentado la tecnología 4G con NTT DoCoMo a la vanguardia. En Europa, O2 ha empezado a desplegar redes LTE en Abril de 2010, aunque todavía se desconoce la fecha para el lanzamiento de los servicios 4G.

2.1.3. Algunos Conceptos Tecnológicos

- UTRA (Universal Terrestrial Radio Access): En Enero de 1998 se decidió que la técnica usada en el acceso radio para UMTS fuese combinación de dos tecnologías: W-CDMA (CDMA de banda ancha) para las bandas pareadas del espectro, y TD-CDMA para bandas no pareadas.

- Tarjetas USIM: La incorporación de la tarjeta SIM en GSM fue una innovación en su momento. En UMTS esta tarjeta tiene su análogo en la USIM (UMTS Subscriber Identity Module). Sus funciones serán las mismas que la tarjeta SIM de GSM pero enriquecidas. La USIM admitirá reconfiguración software, almacenamiento de diversos tipos de datos (firmas, imágenes ...), utilización como tarjeta de crédito, comercio electrónico, etc
- Red Multiservicio: Habilidad de la red para transportar contenidos multimedia independientemente del protocolo que los soporte. De esta manera, la red soporte de UMTS deberá soportar conectividad a redes IP, ATM, X.25, Frame Relay.
- Arquitectura Cliente-Servidor: la red UMTS funcionará como una tubería que realiza el transporte entre terminal del usuario y servidor del servicio al que el usuario accede. En este sentido, la red UMTS será básicamente una "tubería", mientras que el intercambio de información se realiza entre un cliente (terminal) y un servidor (máquina en la cual reside la aplicación).

2.1.4 Arquitectura del núcleo de Red UMTS

2.1.4.1. Introducción

En este apartado se describirá la arquitectura del Núcleo de Red ('Core Network') que se construye en una red UMTS en sus diversas fases de despliegue. Se comentan los elementos de red que componen este Núcleo y las principales interfaces. También se trata el importante aspecto de la evolución de la Red de Transporte sobre la cual se apoya este núcleo.

En el diseño de la arquitectura del Núcleo de Red UMTS, es preciso tener en cuenta varias premisas:

- El Release 00 de las especificaciones puede suponer un cambio importante en el enfoque del Núcleo de Red UMTS respecto al *Release 99* (Dic 99). El Release 99 se basa en una red de transporte ATM, mientras que el Release 00 evoluciona hacia una red de transporte IP.
- Los equipos del 'Core Network' de UMTS constituirán una evolución de las centrales MSC de GSM y de los nodos SGSN de GPRS.
- Otro concepto sobre el que se apoya la evolución de la arquitectura de la red de 3G es la separación de los planos de control y transporte, actualmente juntos en las centrales MSC de 2G. Esta evolución estructural sólo será posible una vez que el grado de madurez de la tecnología asociada lo permita, lo que en la actualidad es un hecho.

Los componentes principales de la arquitectura de red UMTS son los que siguen:

- Núcleo de Red.
- Red de Acceso Radio (UTRAN).
- Terminales móviles (UE, *User Equipment*).

En la especificación de la arquitectura se ha procurado alcanzar el objetivo de UMTS de independizar los servicios y contenidos de la estructura de red. En este marco se separan también en los nodos de la red las funciones físicas (conmutación, tratamiento de las señales) de las funciones lógicas. Las primeras se sustentan en los llamados *Media GateWays* (MGW).

En la figura siguiente se muestra una visión general de la arquitectura de la red.

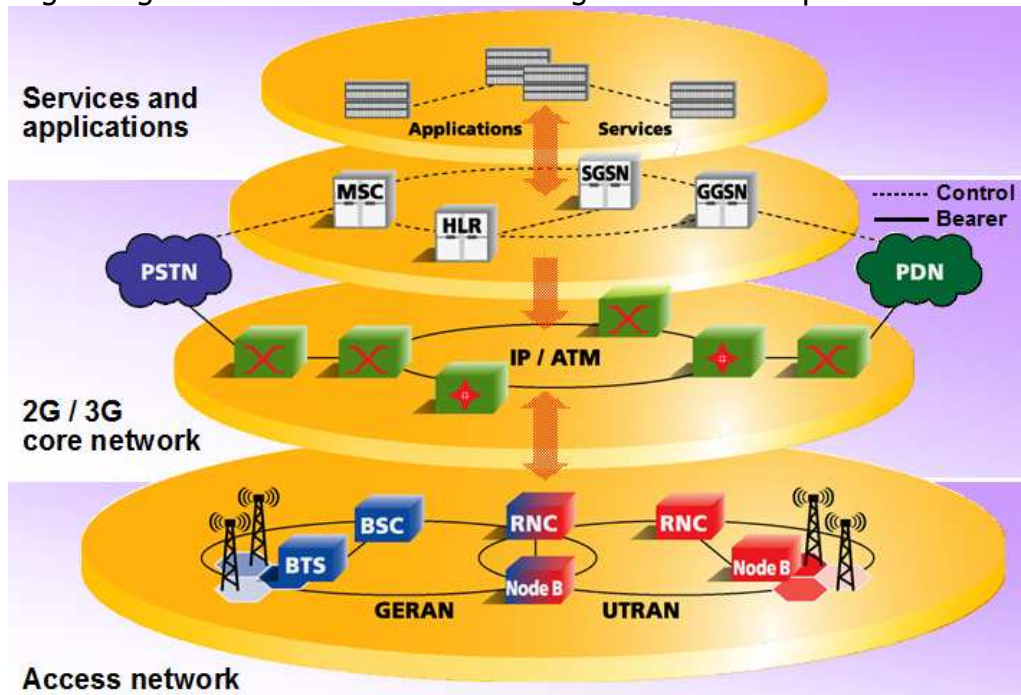


Figura 3. Capas de Arquitectura de Red

En la figura que sigue se aprecian los planos de las tres sub-redes anteriormente comentadas.

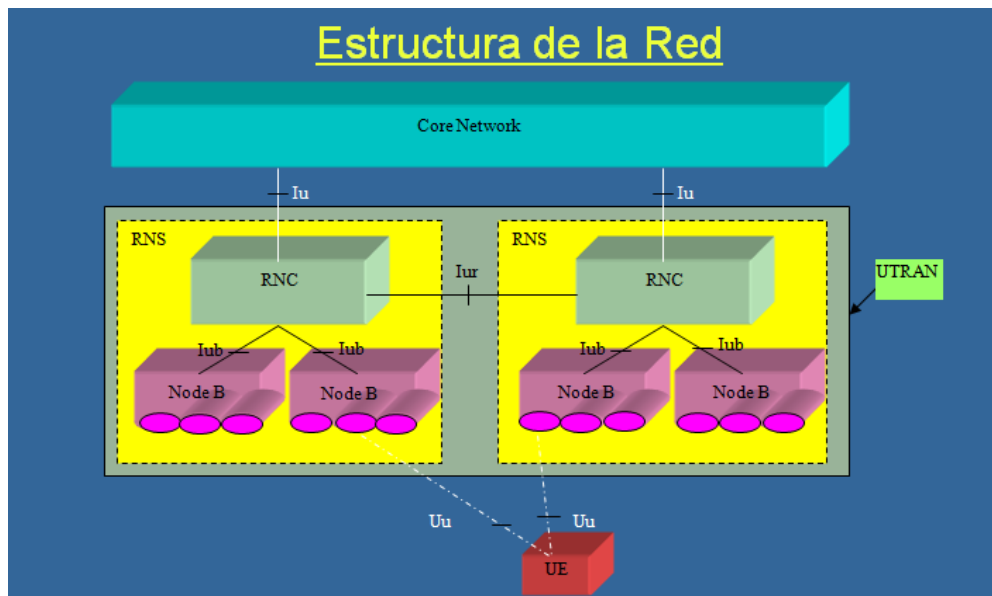


Figura 4. Arquitectura de red UMTS

Se indican además las interfaces fundamentales de la estructura:

- Interfaz Iu entre la UTRAN y el CN.
- Interfaz Uu entre los terminales y la UTRAN.

2.1.4.2. Núcleo de Red

El núcleo de red proporciona las funciones de transporte, gestión e interconexión con otras redes.

El CN se estructura en dos planos, que son el de servicios y el de transporte.



Figura 5. Planos del CN

El plano de transporte alberga dos niveles bien diferenciados, que son el de conmutación y el de control.

El *nivel de conmutación* gestiona la conectividad a la red desde diferentes redes de acceso y el de control que gestiona la conmutación mediante señalización y control. Además, la información de usuario y el empleo de recursos se manejan a nivel de conmutación.

El nivel de conmutación es una capa de recursos distribuidos para la gestión de los flujos de tráfico. Está constituido por los *Media Gateways* (MGW) que procesan información de usuarios y actúan como conmutadores de acceso a la red troncal y la red troncal (*backbone*) que interconecta todos los MGW y también al plano de servicios.

El *nivel de control* consta de diferentes servidores de red o llamadas responsables de seguridad, la movilidad, el establecimiento y la desconexión de sesiones, los servicios suplementarios y de red inteligente.

El plano de servicios, en cambio, alberga los servidores de servicios y aplicaciones. Las aplicaciones residen parcialmente en los terminales y en los servidores específicos de aplicaciones de red.

El Núcleo de Red consta de dos dominios, el de transmisión/conmutación de circuitos (CS) y el de transmisión/conmutación de paquetes (PS), como se muestra a continuación:

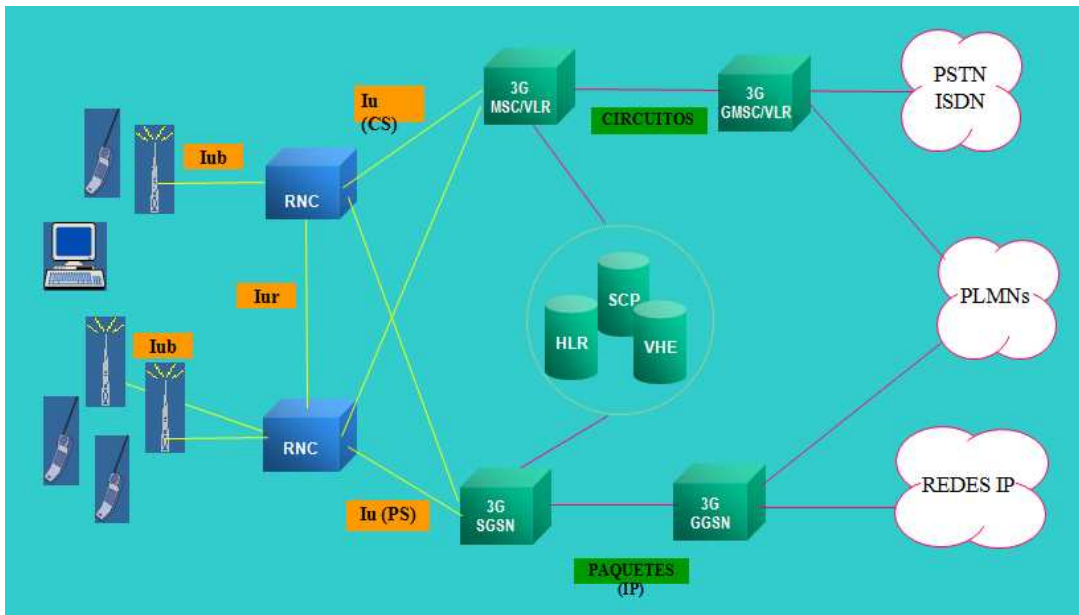


Figura 6. Núcleo de Red

El modo CS se ocupa de las comunicaciones de voz y de datos o vídeo en modo circuito y el dominio PS maneja las comunicaciones de datos en modo paquete. Estos dominios se articulan en nodos de conmutación de servicio y pasarelas. Existen también unidades funcionales para el registro y la autenticación de los usuarios y de equipos e interfuncionamiento.

El *U-MSC* (UMTS Mobile Switching Centre) gestiona y controla los servicios de comunicación en CS. Controla MGW, la movilidad, autenticación, ficheros de tarificación, conecta con servicios de Red inteligente (*trigger*) y sirve además como interfaz SMS. Asimismo está integrado junto con el VLR.

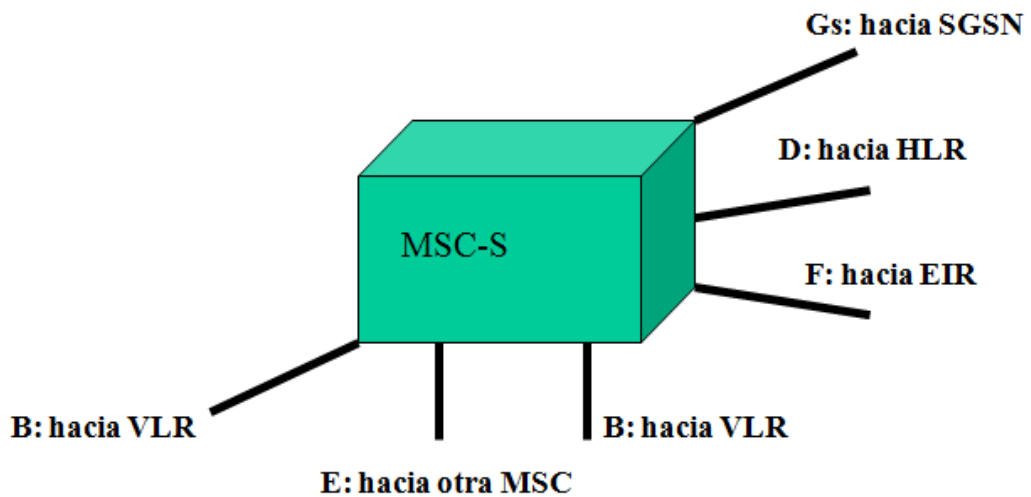


Figura 7. Servidor MSC-S

El *servidor SGSN* maneja las funciones de control relativas a servicios de comunicación PS. Gestiona recursos asociados a MGW y administra la sesión, movilidad, autenticación y tarificación.

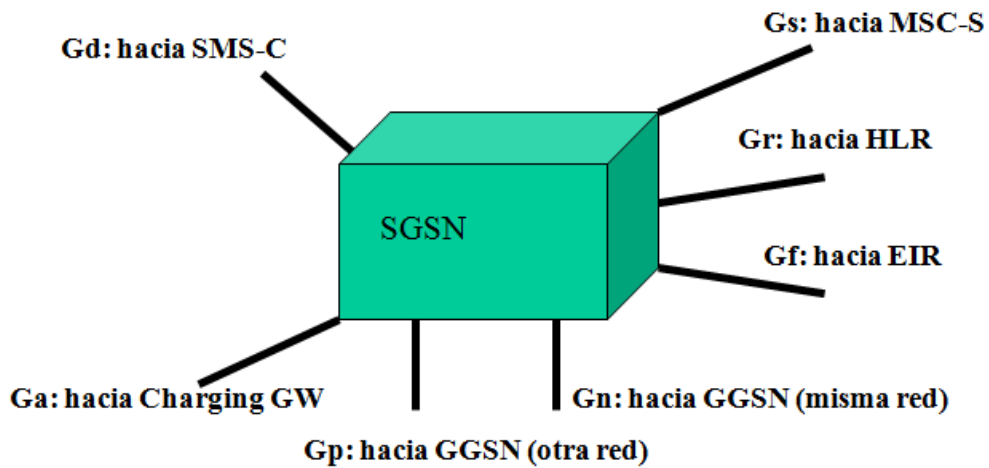


Figura 8. Servidor SGSN

El *MGW* soporta las funciones del plano de usuario para la comunicación CS y PS. Estas funciones incluyen el proceso de información de usuario, generación de tonos, establecimiento y desconexión de circuitos, provisión de información de tarificación, seguridad, encaminamiento, conmutación, calidad de servicio.

El *GGSN* Constituye el final del túnel para el modo de comunicación PS, en la frontera entre Núcleo de Red y el Proveedor de Servicios de Internet. El usuario selecciona (indirectamente) el GGSN a través de una conexión PDP. El GGSN realiza el control del túnel de datos, la gestión de direcciones IP, generación de ficheros de tarificación, control de seguridad, encaminamiento de paquetes, gestión de QoS...

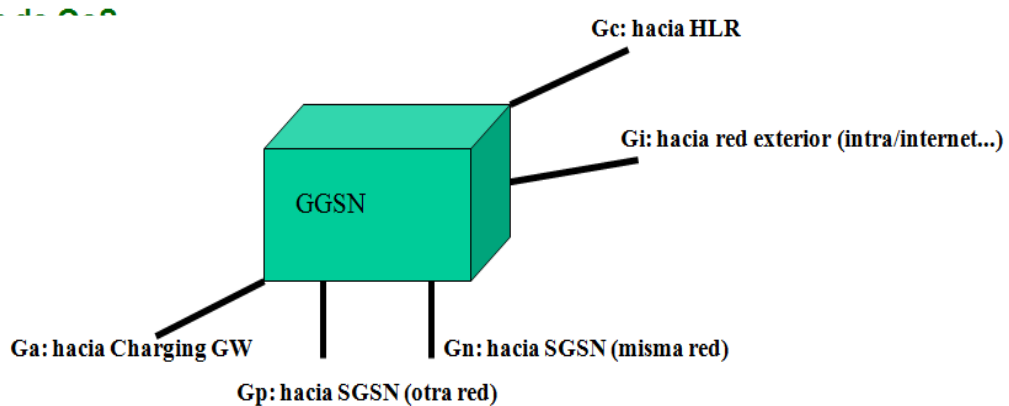


Figura 9. Servidor GGSN

El *HLR* es la base de datos que aloja los datos específicos del usuario y contiene funciones para la administración y control de servicios. Se comunica con MSCs, xGSNs... a través del protocolo MAP. El HLR evolucionará hacia el sistema HSS.

El *Centro de autenticación AuC* realiza funciones de identificación y protección del usuario. Incluye algoritmos para la generación de la autenticación y el cifrado. Protege la red y evita accesos no autorizados.

El *SCP Service Control Point*. Contiene la lógica de los servicios de Red Inteligente, como servicios de redes virtuales o servicios de prepago. Trabaja en cooperación con el control de las funciones de conmutación (MSC-S).

El *EIR* es una base de datos que contiene las identidades y características de los equipos móviles. Es interrogado a través del protocolo MAP desde los elementos

que proporcionan acceso a la red, es decir, MSC-S y SGSN. De esta manera se asegura que el equipo móvil está capacitado para determinados accesos y servicios.

El *Charging Gateway* recoge la información generada por distintos nodos (xGSN, MSC, SMS-C, Buzón de voz, Servidores de Aplicación...) y la encamina a los sistemas de gestión y administración del operador. Realiza pre-proceso de los registros.

El futuro núcleo de red se basará en modo paquete con el protocolo TCP/IP. Este concepto se extenderá también a la red de acceso, configurando el conjunto como una red *Todo IP*.

2.1.4.3. Red de Acceso Radio

La red de acceso radio UTRAN permite la conexión entre los equipos de usuarios y el núcleo de red. La UTRAN es un conjunto de subsistemas de red radio RNS (*Radio Network Subsystem*), enlazados al CN por la interfaz Iu e interconectados entre sí a través de la interfaz Iur.

Cada RNS está constituido por un controlador de radio RNC (*Radio Network Controller*) y un conjunto de Nodos B dependientes de él. Los nodos B se corresponden con las estaciones base. Cada nodo se conecta a su RNC a través de la interfaz Iub.

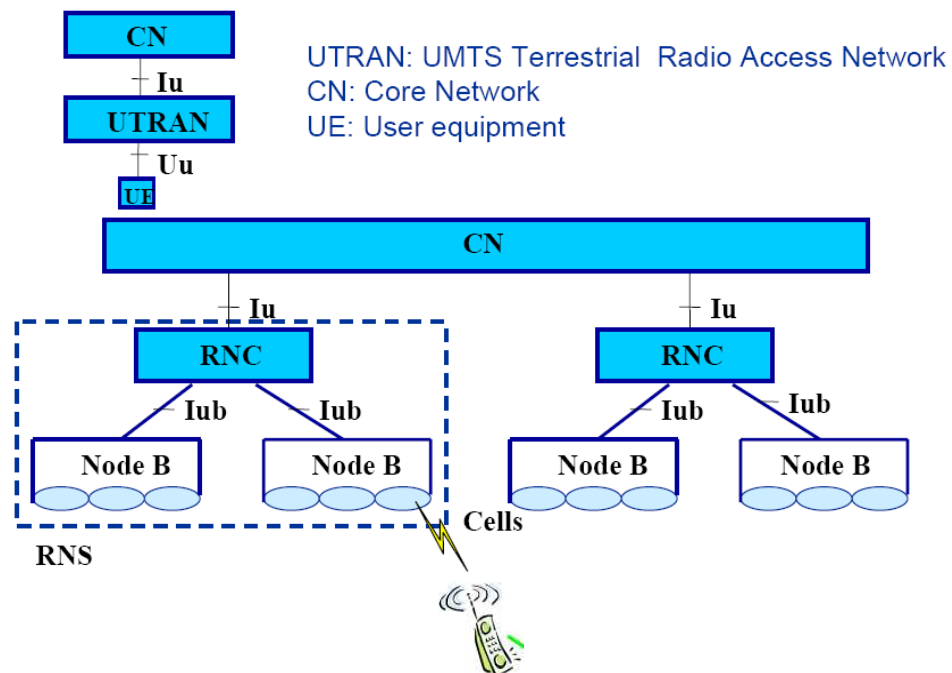


Figura 10. Interfaces UMTS

Para la UTRAN se han definido dos modalidades de W-CDMA:

- 1) El modo dúplex de frecuencia FDD (*Frequency Division Duplex*). El acceso múltiple se realiza por división en código y en frecuencia, utilizando dos portadoras distintas, una para el enlace ascendente y otra para el descendente.
- 2) El modo dúplex temporal TDD (*Time Division Duplex*). El acceso múltiple se realiza por división en código y en el tiempo. Existe una única portadora e intervalos temporales de transmisión, que se reparten entre distintos usuarios y

a su vez entre sentidos de transmisión (ascendente y descendente) siendo el número de *slots* temporales asignados a UL y DL configurables.

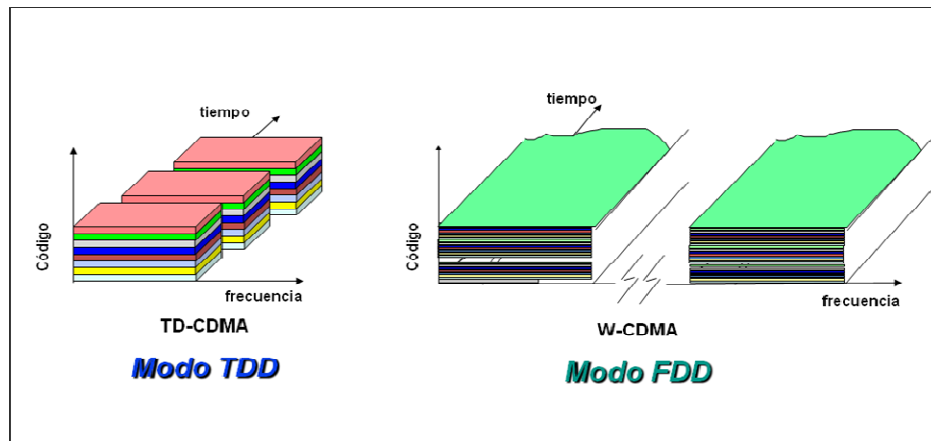


Figura 11. Modo TDD y FDD

En España se han adjudicado 4 licencias, dotada cada una de ellas con 35 MHz de ancho de banda, del cual 30 MHz corresponde a FDD y 5 MHz a TDD.

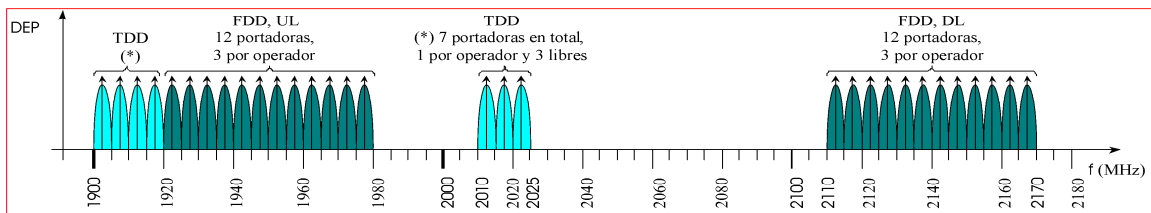


Figura 12. Espectro Radioeléctrico en España

2.2. REQUERIMIENTOS DEL LTE

LTE se ha centrado en un soporte óptimo para servicios de conmutación de paquetes (PS) [3]. Como ya se ha mencionado, los principales requisitos para el diseño de un sistema LTE fueron identificados en el inicio de los trabajos de normalización de LTE y han sido recogidos en el 3GPP TR 25.913. Se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Velocidad de datos.**—Tasas de transferencia de datos de 100 Mbps (*downlink*) y 50 Mbps (*uplink*) para una asignación de espectro de 20 MHz, asumiendo dos antenas de recepción y una antena de transmisión en el terminal.
- **Eficiencia Espectral.**— El objetivo es una mejora en la eficiencia de 3-4 veces en el *downlink* y 2-3 veces en el *uplink* respecto la release 6.
- **Latencia.**— El tiempo de tránsito desde que un paquete accede a la capa 3 del UE hasta que el paquete está disponible en la capa IP de la red de acceso radio y a la inversa debe ser menor de 5ms. También en el plano de control (CP) la latencia debe reducirse para permitirse transiciones rápidas por debajo de 100ms desde el estado acampado al estado activo.

- Ancho de Banda.- Anchos de banda escalables de 5, 10 15 y 20Mhz deben ser soportados. También anchos de banda más pequeños pueden ser adoptados para más flexibilidad (1,4Mhz y 3MHz)
- Interconexión.- La interconexión con los actuales UTRAN / GERAN y con sistemas NO-3GPP se ha de garantizar. Terminales multimodo soportarán los *handovers* hacia y desde redes UTRAN y GERAN, así como las medidas inter-RAT (mediadas de otro sistema mientras el UE se encuentra conectado). El tiempo de interrupción en un *handover* entre E-UTRAN y UTRAN/GERAN deberá ser inferior a 300 ms para servicios en tiempo real y menos de 500ms para servicios que no sean en tiempo real.
- Costos: Reducción de CAPEX y OPEX. La migración debe ser rentable desde la interfaz radio UTRA y la arquitectura de la release 6. Debe estar garantizado una razonable complejidad del sistema y de los terminales, así como el costo y el consumo de potencia. Todas las interfaces especificadas deben ser abiertos para garantizar la interoperabilidad de los equipos de diferentes proveedores.
- Movilidad: El sistema estará optimizado para bajas velocidades del móvil (0-15 km / h), pero mayor velocidad debe estar soportada; considerando un entorno de tren de alta velocidad como un caso especial.
- La asignación del espectro (Spectrum Allocation).- En cuanto al modo de operación, tanto la pareada (*Frequency Division Duplex / Modo FDD*) como la impareada (*Time Division Duplex / TDD modo*) es posible. En FDD tanto el transmisor como el receptor trabajan en diferentes frecuencias, mientras que en TDD lo que tenemos es una multiplexación por división en el tiempo para separar las señales de *downlink* y el *uplink*.
- Calidad de Servicio (QoS): Debe estar garantizada la calidad de servicio extremo a extremo. Se debe soportar la voz sobre IP (VoIP) por lo menos con tan buena eficiencia y latencia como el tráfico de voz sobre redes de circuitos conmutados UMTS.
- Sincronización de la red: El tiempo de sincronización de diferentes puntos de la red no será obligatorio.

2.2.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Con el fin de dar respuesta a los condicionantes mencionados con anterioridad, la estandarización de la Release 8 de 3GPP se inclina por las características que se relacionan a continuación y sobre las que se incidirá de manera más exhaustiva en los apartados posteriores del presente capítulo.

2.2.1.1.- ARQUITECTURA DE RED

En lo que se refiere a la arquitectura de red, la *Release-8* estandariza una solución caracterizada por el aplanamiento y la eliminación de nodos intermedios como el RNC o el SGSN. En lo que a la red de acceso radio E-UTRAN se refiere, ésta se simplifica en gran medida ya que desaparecen las unidades controladoras (RNC en UMTS) y aparece un nuevo elemento de red denominado eNodeB (eNB) como sustituto del NodoB, el cual da soporte tanto

al plano de usuarios como a las terminaciones de los protocolos del plano de control hacia el UE. La arquitectura E-UTRAN se muestra en la imagen siguiente [4]:

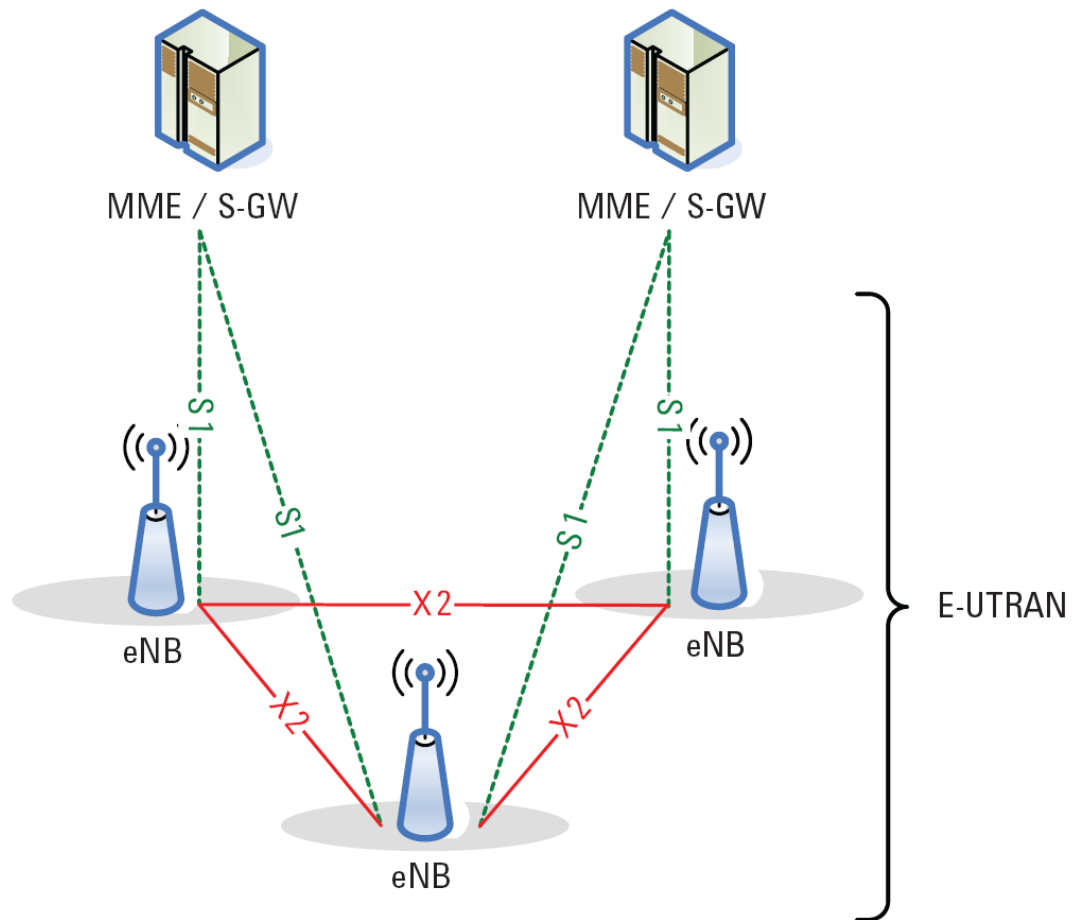


Figura 13. Arquitectura E-UTRAN

Se procede a la separación de la información referente a los planos de control y de usuario. El hecho de implantar un elemento de red separado para la señalización facilita a los operadores la posibilidad de dimensionar la señalización y el tráfico de manera diferente.

Una de las ventajas fundamentales de esta arquitectura es el hecho de estar definida como evolución de las redes 2G y 3G, ya que permite una total interoperabilidad con ellas sin ser necesario implementar unidades de adaptación adicionales.

La solución LTE es una red puramente IP y soporta un único dominio de conmutación de paquetes. Esta arquitectura IP facilita la introducción de servicios IP multimedia a través del sistema IMS (*IP Multimedia Subsystem*), estandarizado por el 3GPP como plataforma de control de servicios que proporciona aplicaciones multimedia sobre diferentes accesos de red. En esto radica una de las principales diferencias con redes anteriores como UMTS y GSM, donde existía conmutación de circuitos por un lado (para la voz) y conmutación de paquetes por otro. Vemos la diferencia en las siguientes imágenes [5]:

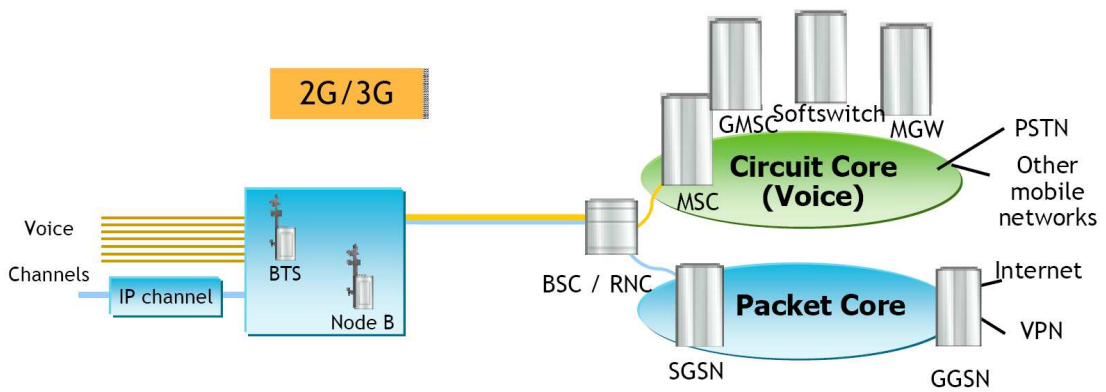


Figura 14. Arquitectura de red 2G/3G

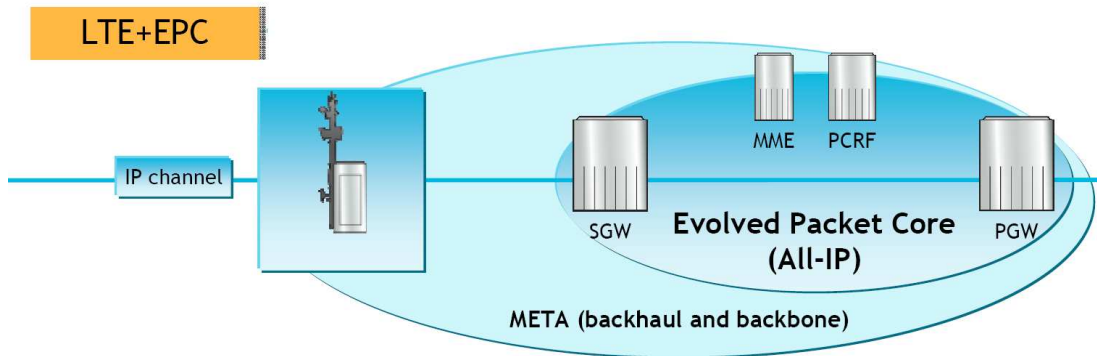


Figura 15. Arquitectura de red LTE

2.2.1.2. ASPECTOS DEL INTERFAZ RADIO

2.2.1.2.1. MODOS DE ACCESO RADIO

La interfaz radio de LTE soporta tanto el modo FDD (Duplex por División de Frecuencia) como el TDD (Dúplex por División en el Tiempo) [4]. En la primera, el transmisor y el receptor operan de manera simultánea en diferentes frecuencias; mientras que en la segunda se ambos trabajan en la misma frecuencia pero en intervalos diferentes de tiempo. Cada uno de estos 2 modos tiene su propia estructura de trama.

En general, FDD es más eficiente y es soportada por mayores volúmenes de dispositivos y de infraestructura, pero TDD es un buen complemento, por ejemplo, en las zonas centrales del espectro

La interfaz aérea LTE también es compatible con MBMS (*Multimedia Broadcast and Multicast Service*), una tecnología relativamente nueva para la emisión de contenidos como la televisión digital al UE usando conexiones punto-multipunto. Las especificaciones 3GPP para MBMS aparecieron por primera vez en UMTS en la *Release 6*. LTE especificará un servicio eMBMS (evolved MBMS) más avanzado, que funciona sobre una red multicast/broadcast sobre frecuencia única (MBSFN - *Multicast/Broadcast over Single-Frequency Network*) usando una onda común sincronizada en el tiempo que se puede transmitir desde varias celdas y con una determinada duración. El MBSFN permite combinación en el aire de varias transmisiones multiceldas en el UE, con un prefijo cíclico (CP) para paliar la diferencia en los retardos de propagación. Para el UE, las transmisiones parecen provenir de una única célula muy grande. Esta técnica hace al LTE altamente eficiente para transmisiones MBMS.

2.2.1.2.2 BANDAS DE FRECUENCIAS SOPORTADAS

Las especificaciones de LTE heredarán todas las bandas de frecuencia definidas para UMTS, cuya lista a día de hoy continúa creciendo. Hay en la actualidad 15 bandas de operación FDD y 8 bandas que operan en TDD. Existe una superposición significativa entre algunas de las bandas. No hay consenso en que banda LTE se desplegará primero, ya que dicha decisión depende en gran manera de condicionantes de carácter local. Esta falta de consenso es una complicación importante para los fabricantes de equipos y contrasta con el inicio de GSM y W-CDMA, los cuales se especificaron para una sola banda. Lo que está ahora firmemente establecido es que ya no se puede asumir que una banda en particular está reservada para una determinada tecnología de acceso [4].

E-UTRA operating band	Uplink (UL) operating band		Downlink (DL) operating band		Duplex mode
	BS receive UE transmit		BS transmit UE receive		
	F_{UL_low}	$- F_{UL_high}$	F_{DL_low}	$- F_{DL_high}$	
1	1920	– 1980 MHz	2110	– 2170 MHz	FDD
2	1850	– 1910 MHz	1930	– 1990 MHz	FDD
3	1710	– 1785 MHz	1805	– 1880 MHz	FDD
4	1710	– 1755 MHz	2110	– 2155 MHz	FDD
5	824	– 849 MHz	869	– 894 MHz	FDD
6	830	– 840 MHz	875	– 885 MHz	FDD
7	2500	– 2570 MHz	2620	– 2690 MHz	FDD
8	880	– 915 MHz	925	– 960 MHz	FDD
9	1749.9	– 1784.9 MHz	1844.9	– 1879.9 MHz	FDD
10	1710	– 1770 MHz	2110	– 2170 MHz	FDD
11	1427.9	– 1452.9 MHz	1475.9	– 1500.9 MHz	FDD
12	698	– 716 MHz	728	– 746 MHz	FDD
13	777	– 787 MHz	746	– 756 MHz	FDD
14	788	– 798 MHz	758	– 768 MHz	FDD
...					
17	704	– 716 MHz	734	– 746 MHz	FDD
...					
33	1900	– 1920 MHz	1900	– 1920 MHz	TDD
34	2010	– 2025 MHz	2010	– 2025 MHz	TDD
35	1850	– 1910 MHz	1850	– 1910 MHz	TDD
36	1930	– 1990 MHz	1930	– 1990 MHz	TDD
37	1910	– 1930 MHz	1910	– 1930 MHz	TDD
38	2570	– 2620 MHz	2570	– 2620 MHz	TDD
39	1880	– 1920 MHz	1880	– 1920 MHz	TDD
40	2300	– 2400 MHz	2300	– 2400 MHz	TDD

Tabla 4. Bandas de frecuencia soportadas

2.2.1.2.3 ANCHOS DE BANDA DE TRANSMISIÓN

Las especificaciones de LTE incluyen anchos de banda variables de canal seleccionable desde 1,4 hasta 20 MHz, con separación de subportadora de 15 kHz [4]. Si se emplea el nuevo eMBMS LTE, también sería posible un espaciado entre subportadoras de 7,5. El espaciado entre subportadoras es constante, independientemente del ancho de banda del canal. 3GPP ha definido la interfaz

aérea LTE para que sea capaz de adaptarse a diferentes anchos de banda con un mínimo impacto sobre el funcionamiento del sistema.

La menor cantidad de recursos que pueden ser asignados en el enlace ascendente o descendente se denomina *Resource Block* (RB). Un RB tiene 180 kHz de ancho y presenta una duración de 0,5 ms de tiempo. Para el estándar LTE, un RB comprende 12 subportadoras con un espaciado de 15 kHz, y para eMBMS con el espaciado opcional de 7,5 kHz entre subportadoras de un RB, se compondría de 24 subportadoras durante 0,5 ms. El número máximo de RB soportado para cada uno de los anchos de banda de transmisión se muestra en la siguiente tabla:

Channel bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration (MHz)	1.08	2.7	4.5	9	13.5	18
Transmission bandwidth configuration (N_{RB}^{UL} OR N_{RB}^{DL}) (RB)	6	15	25	50	75	100

Tabla 5. Número máximo de RB soportados

2.2.1.2.4 TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE EN EL DOWNLINK: OFDM Y OFDMA

Aunque este tema se abordará con mayor profundidad en capítulos posteriores, vamos a enumerar sus puntos más importantes.

La tecnología LTE cuenta con una interfaz radio de gran potencial, que se desmarca de las tecnologías anteriores al escoger esquemas de modulación adaptados a las necesidades del enlace. Para el *downlink* se utiliza una modulación multiportadora ortogonal OFDMA, que mediante la inserción de un prefijo cíclico proporciona un excelente rendimiento frente al devastador efecto del desvanecimiento multirayecto y nos permite utilizar anchos de banda superiores a 5 Mhz sin que se disparen los costes de ecualización y se degrade el rendimiento.

OFDMA es una variante de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), un esquema de modulación digital multiportadora que es ampliamente utilizado en sistemas inalámbricos, pero relativamente nuevo en celulares.

OFDM es una técnica de comunicación que divide un canal, en un número determinado de bandas de frecuencias equiespaciadas; en cada banda se transmite una subportadora que transporta una porción de la información del usuario [6]. Cada subportadora es ortogonal al resto, dándole el nombre a esta técnica de multiplexación por división de frecuencia. OFDM es una técnica basada en la multiplexación por división de frecuencia (FDM), pero el hecho de que cada subportadora sea ortogonal al resto permite que el espectro de cada una estén parcialmente solapadas como se aprecia en la figura, y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras.

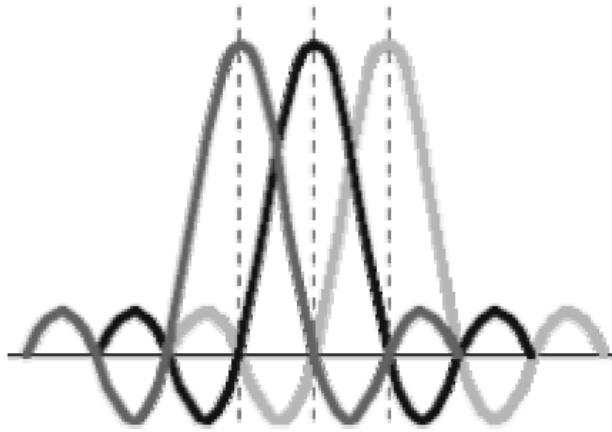


Figura 16. Subportadoras

Un sistema OFDM toma un flujo de datos y lo divide en N flujos paralelos, cada uno a una tasa $1/N$ de la original. Luego cada flujo es mapeado a una subportadora y combinado usando la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), obteniendo la señal en el dominio del tiempo a transmitir. Por ejemplo, si se utiliza un sistema con 100 subportadoras y se transmite un solo flujo con una tasa de 1 [Mbps], este es convertido en 100 flujos de 10 [Kbps]. Al crear flujos de datos paralelos más lentos, provoca que la duración de cada símbolo de la modulación aumente en un factor de 100. Con una adecuada elección de los parámetros del sistema, como el número de subportadoras y la distancia entre éstas pueden reducir enormemente, o incluso eliminar, la interferencia inter-simbólica (ISI)

2.2.1.2.5 TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE EN EL UPLINK: SC-FDMA

A pesar de lo expuesto con anterioridad, OFDM tiene algunas desventajas. Las subportadoras están muy próximas entre sí, haciendo a OFDM muy sensible a los errores de frecuencia y ruido de fase. Por esta misma razón, OFDM también es sensible al efecto Doppler, lo que provoca interferencias entre las subportadoras. OFDM también crea señales de altos niveles de potencia media-potencia de pico (*peak-to-average power ratio*, PAPR); y es este el motivo por el que una modificación de esta tecnología denominada SC-FDMA se utiliza en el enlace ascendente [3].

SC-FDMA resuelve este problema mediante la agrupación de los bloques de recursos; de una manera que se reduce la necesidad de linealidad y el consumo de energía en el amplificador de potencia

En esencia, SC-FDMA significa "crear una forma de onda de una sola portadora y trasladarla a la parte deseada del dominio de la frecuencia". Mientras que en OFDM se transmiten " M " símbolos en paralelo, repartiendo el ancho de banda entre ellos y cada símbolo tiene una duración igual al tiempo de símbolo; en SC-FDMA se transmiten " M " símbolos secuencialmente cada uno ocupando todo el ancho de banda disponible y con una duración igual a una parte del tiempo de símbolo.

Después de una consideración de las características de OFDMA y SC-FDMA, podemos concluir que SC-FDMA ofrece las ventajas de OFDMA (resistencia especialmente robusta al multicamino) sin el problema del alto PAPR. El uso de SC-FDMA en LTE, sin embargo, se limita al *uplink* ya que el incremento del

procesamiento en el dominio del tiempo sería una carga considerable para la estación base, que tiene que manejar de manera dinámica la transmisión multi-usuario.

2.2.1.2.6 MECANISMOS DE ANTENAS AVANZADAS

Muy importante para LTE es el empleo de técnicas de antenas múltiples, que se utilizan para aumentar la cobertura y la capacidad de la capa física. La adición de más antenas en un sistema radio proporciona la posibilidad de mejoras en el rendimiento debido a que las señales radiadas tomarán diferentes rutas físicas. Hay tres tipos principales de técnicas de antenas múltiples:

- El primero hace uso directo de la diversidad de camino, en la que un camino radiado puede estar sujeto al desvanecimiento y el otro no.
- La segunda utiliza *beamsteering* (configuración del haz de emisión de la antena) mediante el control de las relaciones de fase de las señales eléctricas radiadas por las antenas para dirigir físicamente la energía emitida.
- El tercer tipo emplea separación espacial (las diferencias de camino introducidas por la separación de antenas) a través del uso de multiplexado espacial o formación de haz (*beamforming*), también conocido como técnicas *multiple-input, multiple-output* (MIMO). Un sistema MIMO conforma una parte esencial en LTE de cara a satisfacer los ambiciosos requisitos de *throughput* y eficiencia espectral. MIMO hace referencia a la utilización de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor. Para el enlace descendente LTE, una configuración de 2x2 MIMO se asume como la configuración base, es decir, dos antenas de transmisión en la estación base y dos antenas de recepción en el lado del terminal. Diferentes ganancias se puede lograr en función del modo MIMO que se utiliza (2x2, 4x4)

No hay una solución única de antenas que abarque todos los escenarios (macrocélulas, microcélulas,...). Por ejemplo, altas tasas de transmisión de datos se pueden lograr con soluciones de múltiples antenas de 2x2 o 4x4 (MIMO), y la ampliación de la cobertura se puede lograr con formación de haz en base a las necesidades que se tengan.

2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA

En la figura siguiente, se ilustra de forma detallada la arquitectura completa del sistema LTE, denominado formalmente en las especificaciones como *Evolved Packet System* (EPS) [7].

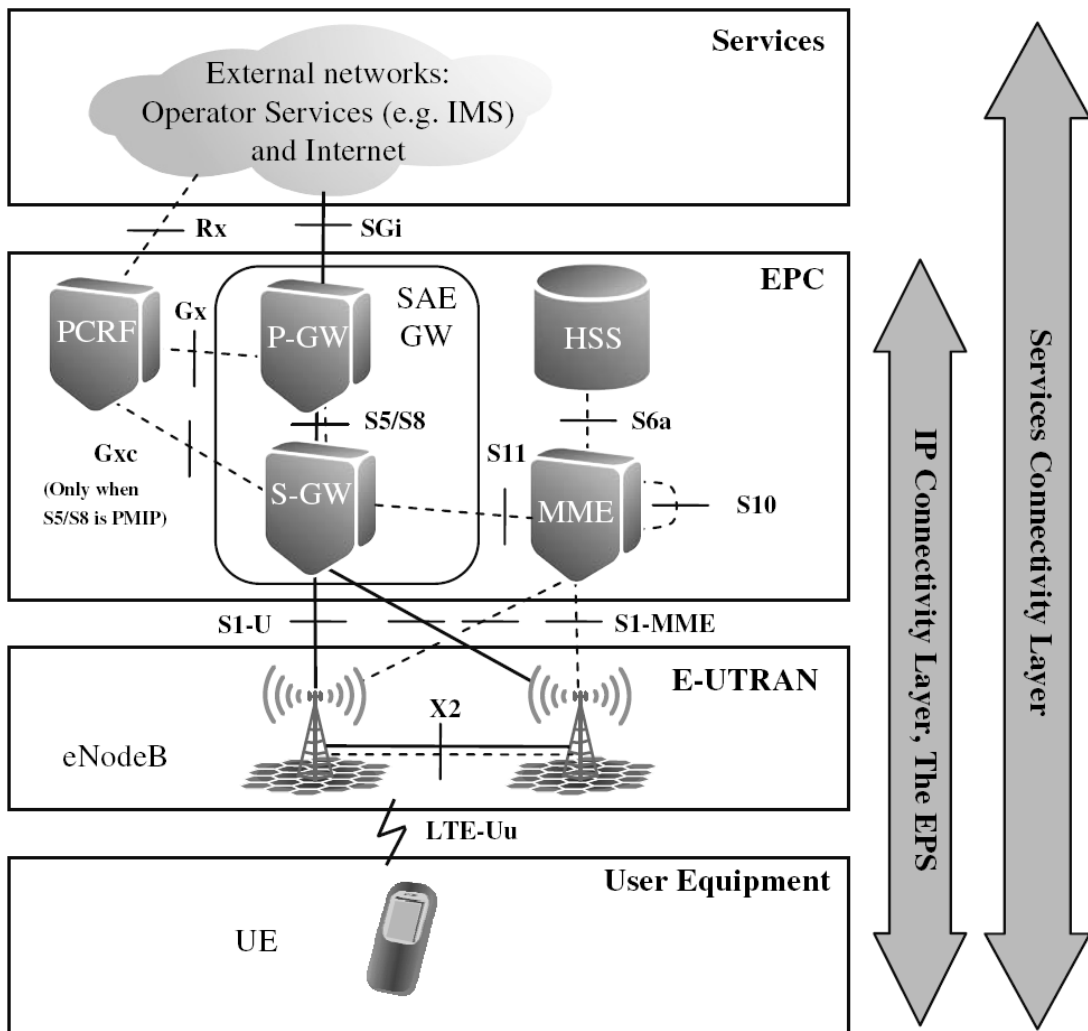


Figura 17. Arquitectura en cuatro dominios básicos

Esta figura muestra la división de la arquitectura en 4 dominios básicos de alto nivel:

- + *User Equipment* (UE).- El terminal de usuario
- + La nueva red de acceso E-UTRAN
- + El nuevo dominio de paquetes EPC de la red troncal (denominado en adelante simplemente como red troncal EPC)
- + El dominio de los Servicios.

Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito (en el sistema LTE los servicios con restricciones de tiempo real se soportan también mediante conmutación de paquetes).

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas IMS y/o otras redes de telecomunicaciones como Internet. Las prestaciones de calidad de servicio (e.g., tasa de datos en bits/s, comportamientos en términos de retardos y pérdidas) de un servicio de transferencia de paquetes IP puede configurarse en base a las

necesidades de los servicios finales que lo utilicen, cuyo establecimiento (señalización) se lleva a cabo a través de plataformas de servicios externas (e.g., IMS) y de forma transparente a la red troncal EPC. Formalmente, el servicio de transferencia de paquetes IP ofrecido por la red LTE entre el equipo de usuario y una red externa se denomina servicio portador EPS (*EPS Bearer Service*). Asimismo, la parte del servicio de transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina E-UTRAN *Radio Access Bearer* (ERAB) [8].

En la figura anterior se muestran las principales interfaces de E-UTRAN y EPC. Tal como se verá más adelante, la interfaz entre E-UTRAN y EPC se denomina S1 y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina LTE-Uu. Por otro lado, las plataformas de servicios como IMS y la conexión a redes de paquetes externas IP se llevan a cabo mediante la interfaz SGi de la EPC. La interfaz SGi es análoga a la interfaz Gi definida en las redes GPRS/UMTS y constituye el punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE (los terminales conectados a la red LTE son "visibles" a las redes externas a través de esta interfaz mediante su dirección IP). Los mecanismos de control de los servicios de transporte ofrecidos por EPC se sustentan en información proporcionada por otros elementos de la red troncal que no son exclusivos del sistema LTE sino que pueden dar soporte también a otros dominios de los sistemas 3GPP.

Otra característica fundamental del sistema LTE es que contempla también el acceso a sus servicios a través de UTRAN (red de acceso UMTS) y GERAN (red de acceso GSM/UMTS) así como mediante la utilización de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP (e.g., CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11, etc.). La interconexión de las redes de acceso alternativas, tanto 3GPP como no, se soporta a través de un conjunto de interfaces de la EPC que se detallarán con posterioridad.

Finalmente, aunque no quede reflejado en la figura anterior, es importante destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la red troncal EPC como de la red de acceso E-UTRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional. Por tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP tales como routers, servidores DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS (*Domain Name Server*) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP.

2.3.2 ENTIDADES DE RED

2.3.2.1 UE (USER EQUIPMENT)

El UE es el dispositivo que el usuario final utiliza para la comunicación. Por lo general se trata de un dispositivo de mano como un teléfono inteligente o una

tarjeta de datos similar a los utilizados actualmente en 2G y 3G, o podría ser incorporado, por ejemplo, a un ordenador portátil. El UE también contiene el módulo de identificación del abonado universal (USIM- *Universal Subscriber Identity Module*), que es un módulo separado del resto de la UE, y que a menudo se llama equipo terminal (TE). USIM es una aplicación que se encuentra en una tarjeta extraíble inteligente llamado *Universal Integrated Circuit Card* (UICC) y que se utiliza para identificar y autenticar al usuario; así como para obtener claves de seguridad de cara a proteger la transmisión en la interfaz de radio [7].

En definitiva, el UE es una plataforma para aplicaciones de comunicación, que se comunica con la red para el establecimiento, mantenimiento y liberación de los enlaces de comunicaciones que el usuario final necesite. Esto incluye funciones de gestión de la movilidad, tales como entregas de informes y reportes sobre la ubicación del terminal llevadas a cabo según las instrucciones de la red. Tal vez lo más importantes es que el UE proporciona la interfaz de usuario para el abonado de manera que aplicaciones tales como VoIP se pueden emplear para establecer una llamada de voz.

2.3.2.2 E-UTRAN Node B (eNodeB)

El único nodo en el E-UTRAN es el E-UTRAN Nodo B (eNodeB). En pocas palabras, el eNodeB es una estación base de radio en la que está el control de todas las funciones relacionadas con la radio. Las estaciones base eNodeB están típicamente distribuidas por todo el área de cobertura de la red.

Funcionalmente el eNodeB actúa como un puente de capa de 2 entre el UE y el EPC, por ser el punto de terminación de todos los protocolos de radio hacia el UE, y la transmisión de datos entre la conexión radio y la correspondiente conectividad IP hacia el EPC. En esta función, el eNodeB realiza cifrado/descifrado de los datos de UP, y también la compresión/descompresión de la cabecera IP; lo que significa evitar en repetidas ocasiones el envío de los mismos datos en la cabecera IP.

El eNodeB gestiona también muchas funciones del plano de control (CP). El eNodeB es responsable de la gestión de recursos radio (*RRM- Radio Resource Management*), como por ejemplo controlar el uso de la interfaz de radio, que incluye entre otras cosas, la asignación de recursos basado en peticiones, priorización de tráfico de acuerdo con la calidad de servicio requerida (QoS), y la constante monitorización y seguimiento del uso de recursos.

Además, el eNodeB tiene un papel importante en la gestión de la movilidad (MM). El eNodeB controla y analiza las mediciones de la señal radio llevadas a cabo por el UE; hace mediciones similares por sí mismo, y en base a ellas toma decisiones de traspaso de UE entre celdas. Esto incluye el intercambio de señalización de traspaso entre otros eNodeBs y el MME. Cuando un nuevo UE se activa bajo un eNodeB y solicita conexión a la red, el eNodeB es también responsable de dirigir esta solicitud a la MME que servía anteriormente al UE, o seleccionar una nueva MME, si una ruta a la anterior MME no está disponible o la información de encaminamiento está ausente.

La siguiente figura muestra las conexiones que tiene el eNodeB a los nodos lógicos adyacentes, y resume las principales funciones de estas interfaces. En

todas las conexiones el eNodeB puede estar en una relación uno-a-muchos o muchos-a-muchos. El eNodeB puede servir a múltiples UEs en su área de cobertura, pero cada UE se conecta a un solo eNodeB a la vez. El eNodeB necesitará estar conectado a los eNodeBs vecinos a los que un *handover* o traspaso pueda ser necesario [7].

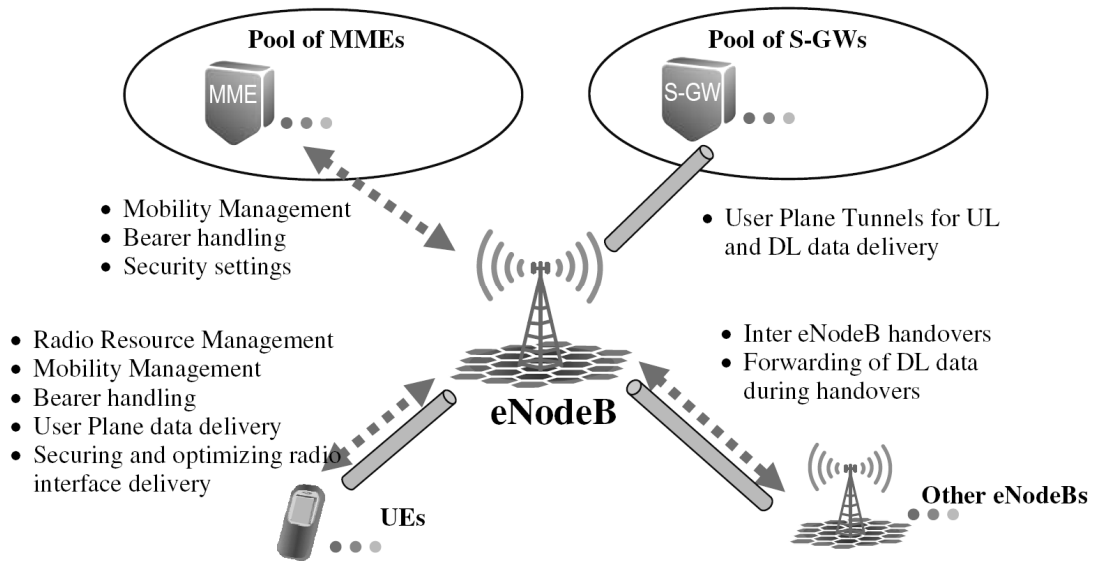


Figura 18. Distintas conexiones del eNodeB

Tanto los MMEs como los S-GWs pueden ser agrupados, lo que significa que un conjunto de estos nodos es asignado para servir a un conjunto particular de eNodeBs. Desde la perspectiva de un único eNodeB esto significa que puede necesitar conectarse a muchos MMEs S-GWs. Sin embargo, cada UE serán atendido por un solo MME y S-GW al mismo tiempo, y el eNodeB tiene que realizar un seguimiento de esta asociación. Esta asociación nunca va a cambiar desde el punto de vista de un único eNodeB, ya que MME o S-GW sólo se puede cambiar en un *handover* inter-eNodeB (traspaso entre eNodeBs diferentes).

2.3.2.3 MOBILITY MANAGEMENT ENTITY (MME)

El MME (*Mobility Management Entity*) es el elemento principal de control en el EPC. Normalmente, el MME es un servidor en un lugar seguro dentro de las instalaciones del operador; que trabaja sólo en el plano de control (CP), y no está involucrado en el camino del plano de usuario (UP) [7].

Además de las interfaces que terminan en el MME y que se aprecian en la figura anterior en que describe arquitectura, el MME también tiene una conexión lógica (CP) directamente al UE; y esta conexión se utiliza como el principal canal de control entre el UE y la red.

A continuación se enumeran las principales funciones del MME:

→ Autenticación y seguridad: Cuando un UE se registra en la red por primera vez, el MME inicia la autenticación, mediante la realización de los siguientes pasos:

+ Descubre la identidad permanente del UE, ya sea de la red visitadas anteriormente o la propia del UE,

+ Solicita del HSS (*Home Subscription Server*) de la red local del UE, los vectores de autenticación que contienen el par de parámetros solicitud-respuesta,

+ Envía la petición de autenticación al UE,

+ Y compara la respuesta recibida del UE con la que se recibió de la red origen.

Esta función es necesaria para verificar que la UE es quien dice ser. El MME puede repetir la autenticación cuando sea necesario o periódicamente. El MME calculará el cifrado y las claves de protección de la integridad de los UEs con la clave maestra recibida en el vector de autenticación de la red doméstica, y que controla por separado los ajustes del plano de control (CP) y del plano de usuario (UP) relacionados con E-UTAN. Estas funciones se utilizan para proteger la comunicación de las escuchas y de la alteración por terceros no autorizados, respectivamente. Para proteger la privacidad del UE, el MME también asigna a cada UE una identidad temporal denominada Globally Unique Temporary Identity (GUTI), de modo que la necesidad de enviar la identidad permanentes del UE - *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI) - sobre la interfaz de radio se reduce al mínimo. El GUTI pueden ser reasignado, por ejemplo, periódicamente para evitar cualquier tipo de seguimiento no autorizado sobre el UE.

→ Gestión de la Movilidad: El MME realiza un seguimiento de la ubicación de todos los UEs en su área de servicio. Cuando un UE lleva a cabo su primer registro en la red, el MME creará una entrada para el UE, y señala la ubicación al HSS de la red origen (*home*) del UE. El MME solicitara los recursos adecuados en el eNodeB, así como en el S-GW que se haya seleccionado para el UE. El MME se mantendrá el seguimiento de la ubicación del UE, ya sea en el nivel de eNodeB, por ejemplo si el UE sigue conectado es decir, está en comunicación activa; o en el ámbito del Área de Seguimiento (TA- *Tracking Area*), que es un grupo de eNodeBs en caso de que el UE esté en modo *idle*, y el mantenimiento de un camino de datos no sea necesario. El MME controla la creación y liberación de recursos basado en los cambios de estado del UE. El MME también participa en la señalización de control de *handovers* de un UE en modo activo entre eNodeBs, SGWs o MMEs. El MME está involucrado en cada cambio de eNodeB, ya que no hay un controlador de red radio (*Radio Network Controller*) independiente que pueda ocultar la mayor parte de estos eventos. Un UE en modo *idle* (no activo) informará sobre su ubicación de manera periódica o bien cuando se mueve a otra área de seguimiento (*Tracking Area - TA*). Si los datos son recibidos desde redes externas para un UE en estado *idle*, el MME será notificado, y éste lo tramitará a los.

→ La gestión del Perfil de Suscripción y del servicio de conectividad: En el momento del registro de un UE en la red, el MME se encarga de recuperar su perfil de suscripción de la red "home". El MME guardará esta información durante el tiempo que esté sirviendo al UE. Este perfil determina qué *Packet Data Network* (PDN) deben ser asignados al UE en la conexión de red. El MME configurará automáticamente el portador (*bearer*) por defecto, lo que da al UE la conectividad IP básica. Esto incluye la señalización CP con el eNodeB, y el S-GW. En cualquier momento después, el MME es posible que tenga que participar en la creación de portadores (*bearers*) que se beneficien de un tratamiento de mayor prioridad. El MME puede recibir la solicitud para establecer un portador

dedicado ya sea del S-GW, si la solicitud se origina en el dominio de servicio de operador; o directamente del UE, si es éste el que requiere una conexión a un servicio del dominio de servicios del operador.

La figura que aparece a continuación [7] muestra las conexiones que el MME tiene a los nodos lógicos que lo rodean, y resume las principales funciones de estas interfaces. En principio, el MME se puede conectar a cualquier otro MME en el sistema, pero en general la conectividad se limita a un único operador de red. La conectividad remota entre MMEs se puede utilizar cuando un UE que ha viajado muy lejos mientras se encontraba apagado, pretende registrarse en un nuevo MME, el cual recupera del MME visitado anteriormente: la identidad permanente del UE y la identidad internacional del abonado móvil (IMSI). La conexión entre MME con MMEs vecinas se utiliza en los *handovers*.

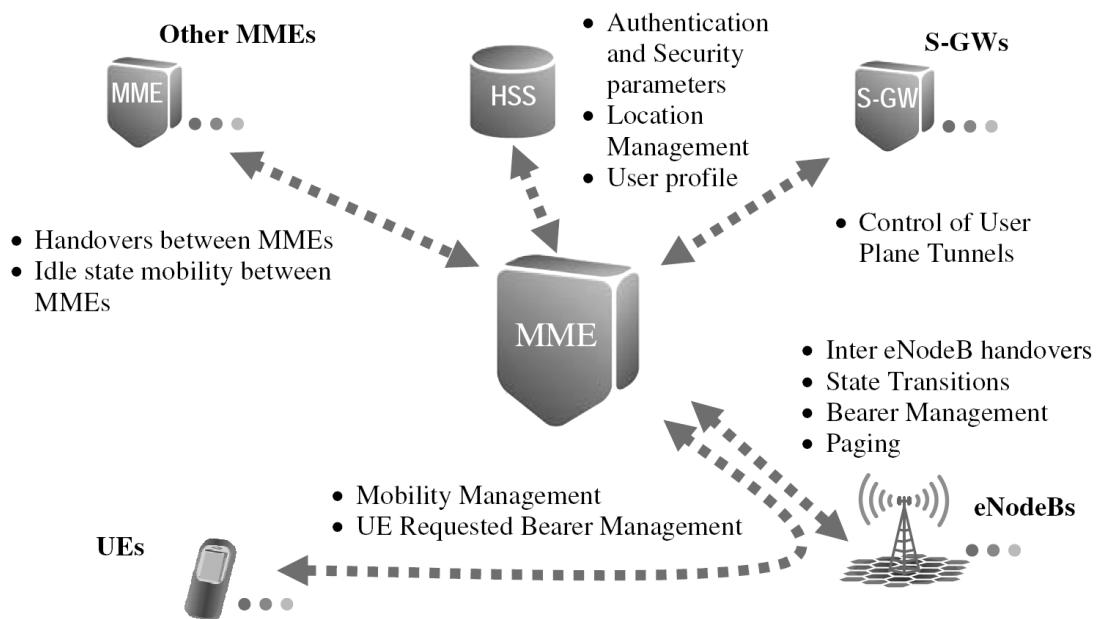


Figura 19. Conexiones lógicas del eNodeB

La conectividad a un cierto número de HSSs, también necesitará ser soportada. El HSS está localizado en cada red "home", y una ruta hacia él se puede encontrar basándonos en el IMSI. Cada MME se puede configurar para controlar una serie de S-GWs y eNodeBs. Tanto los S-GWs como los eNodeBs también pueden ser conectados a otros MMEs. El MME puede dar servicio a un cierto número de UEs al mismo tiempo, mientras que cada UE sólo se conectará a un MME cada vez.

2.3.2.4 SERVING GATEWAY (S-GW)

Esta entidad actúa de pasarela del plano de usuario (UP) entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Al igual que sucede con la entidad MME, un usuario registrado en la red LTE dispone de una entidad S-GW asignada en la EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. La asignación de la pasarela S-GW responde también a criterios geográficos así como de balanceo de cargas. Entre las principales funciones del S-GW podemos destacar [8]:

+ La entidad S-GW proporciona un punto de anclaje en la red troncal EPC con respecto a la movilidad del terminal entre eNodeBs. De esta forma, en un proceso de *handover* entre dos eNodeBs, el cambio del plano de usuario puede únicamente derivar en un cambio del servicio portador S1 entre los eNBs

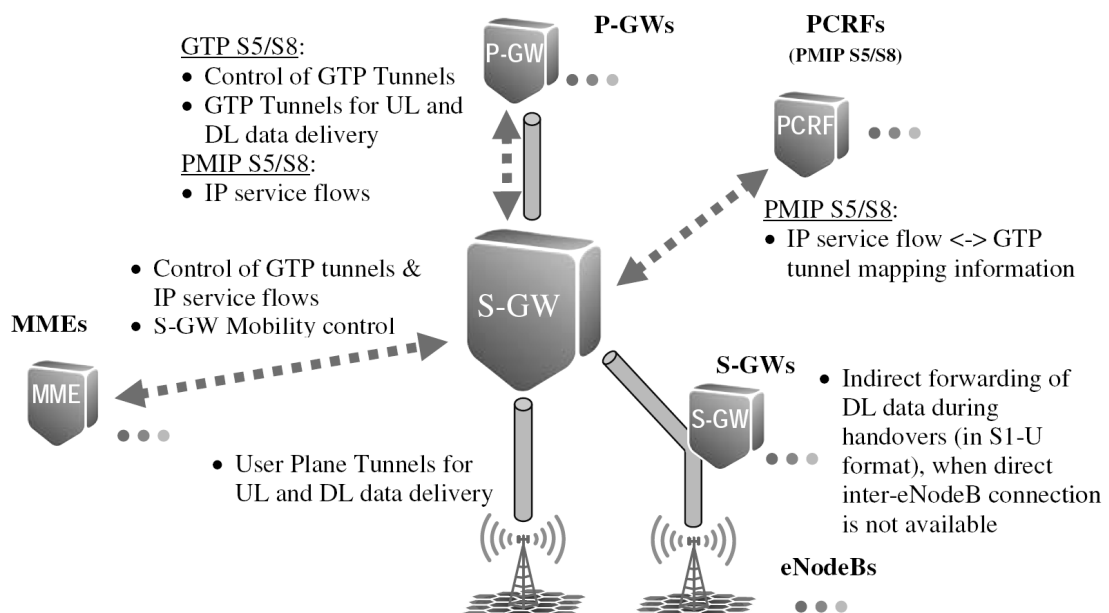
implicados y el S-GW, manteniéndose sin cambios el resto del plano de usuario (camino entre S-GW y P-GW).

+ La funcionalidad de punto de anclaje también se aplica a la gestión de movilidad con las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN-UMTS y GERAN-GSM/GPRS). De esta forma, equipos de usuario que se conecten a la red LTE a través de UTRAN o GERAN, disponen también de un S-GW asociado en la red troncal EPC por el que fluye su plano de usuario.

+ Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentren en modo *idle*. En la red LTE, el plano de usuario entre S-GW y el equipo de usuario puede “desactivarse” cuando no haya tráfico para transmitir. Es decir, aunque las conexiones y servicios portadores EPS permanezcan activos, un terminal puede encontrarse en estado *idle* y, por tanto, no estar conectado a ningún eNODEB. Así pues, cuando se recibe tráfico de la red externa dirigido a un usuario en modo *idle*, este tráfico llega hasta la entidad S-GW a cargo de ese usuario, que retiene temporalmente los paquetes IP e inicia (a través de la señalización pertinente con la entidad MME) el reestablecimiento del plano de usuario hasta el equipo de usuario.

+ Encaminamiento del tráfico de usuario. Como todo el tráfico de un usuario fluye a través de una pasarela S-GW, ésta alberga la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida (tráfico IP proveniente de los equipos de usuario) hacia la pasarela (o pasarelas) P-GW que corresponda y el tráfico de bajada (proveniente de las pasarelas P-GW) hacia el eNodeB a través del cual se encuentra conectado el equipo de usuario. Es importante destacar que, aunque un usuario puede tener múltiples conexiones establecidas con diferentes pasarelas P-GW de forma simultánea, todo el tráfico atraviesa una única S-GW.

La figura siguiente muestra las conexiones que el S-GW tiene a los nodos lógicos adyacentes [7]:



2.3.2.5 PACKET DATA NETWORK GATEWAY (P-GW)

Packet Data Network Gateway (P-GW, a menudo abreviado como PDN-GW) es la entidad encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas (denominadas como *Packet Data Network*, PDN, en las especificaciones 3GPP). Es decir, a través de la entidad P-GW, un usuario conectado al sistema LTE resulta "visible" en la red externa. Por tanto, los paquetes IP generados por el usuario se inyectan en la red externa a través de esta pasarela y, viceversa, todo el tráfico IP dirigido a un terminal LTE proveniente de la red externa va a ser encaminado hasta el P-GW. Un usuario tiene asignada como mínimo una pasarela P-GW desde su registro en la red LTE [8]. Entre las principales funciones de la pasarela P-GW podemos destacar:

- + Aplicación de las reglas de uso de la red (p.e., *policy control*) y control de tarificación a los servicios portadores que tenga establecidos el terminal.

- + La asignación de la dirección IP de un terminal utilizada en una determinada red externa se realiza desde la pasarela P-GW correspondiente. La dirección puede ser una dirección IPv4, IPv6 o bien un par de direcciones (IPv4, IPv6). El mecanismo de asignación de la dirección se sustenta en la señalización propia de la red LTE (p.e., el terminal recibe la dirección IP a través de los protocolos NAS) o bien en la utilización de protocolos propios de redes IP como DHCP

- + La pasarela P-GW actúa de punto de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes no 3GPP. La pasarela alberga funciones de Home Agent (HA) para proporcionar continuidad de servicio en caso de utilizar el protocolo Mobile IPv4 (MIPv4) para gestionar la movilidad entre la red LTE y, por ejemplo, una red WiMAX. Además de MIPv4, la pasarela incluye soporte de movilidad para los protocolos Dual Stack MIPv6 (DSMIPv6) y Proxy MIPv6 (PMIPv6).

- + El tráfico IP que transcurre por la pasarela P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio portador EPS correspondiente. Esto permite, por un lado, aplicar las reglas de uso y tarificación antes comentadas, y por otro, aplicar funciones de inspección y verificación de la validez de los paquetes IP que cursa la red (*packet screening*). De esta forma, la pasarela puede descartar los paquetes IP que sean considerados como tráfico anómalo (p.e., un equipo de usuario envía paquetes con una dirección o puertos para los que no está autorizado).

Las conexiones del P-GW con otros nodos lógicos así como sus funciones principales se muestran a continuación [7]:

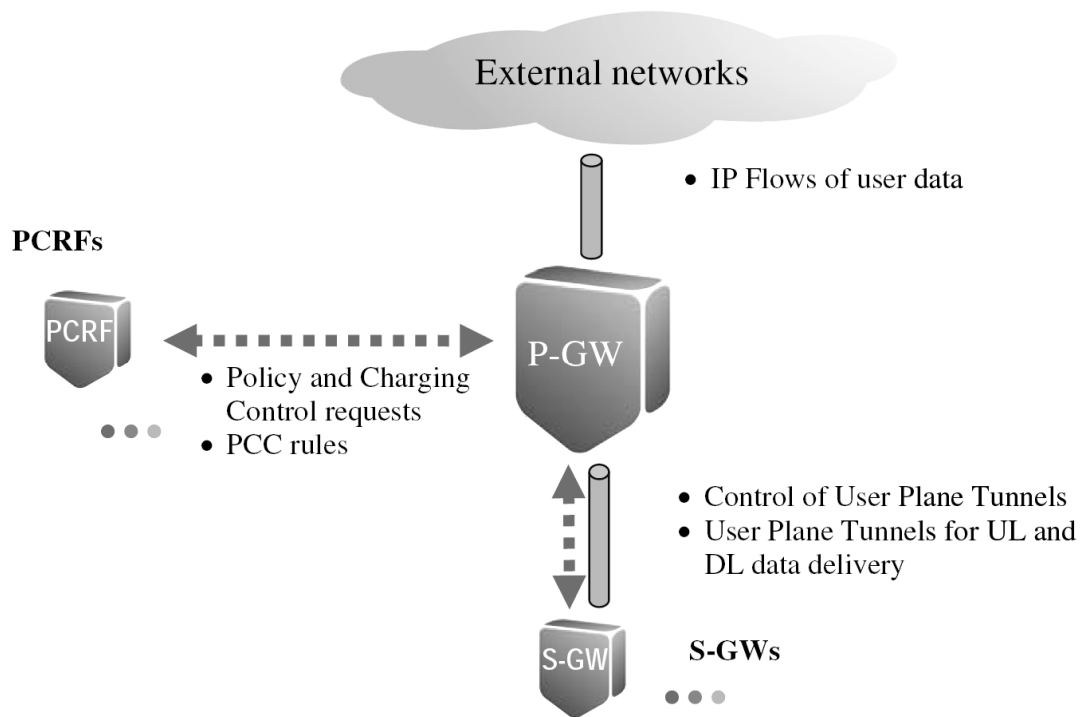


Figura 21. Conexiones del P-GW con otros nodos lógicos

2.3.2.6 POLICY AND CHARGING RESOURCE FUNCTION (PCRF)

La entidad PCRF forma parte del marco funcional denominado PCC (*Policy and Charging Control*) que se utiliza para controlar los servicios portadores que ofrece la red LTE (e.g., activación y determinación de los parámetros de QoS asociados a cada servicio portador) así como realizar el control de los mecanismos de tarificación (e.g., tarificación *on-line*, *offline*, medición del volumen de datos transferido, tiempo transcurrido, etc.). Así pues, mediante la interfaz Gx, el PCRF gestiona los servicios portadores EPS de la red LTE mediante el envío de unas reglas de uso (reglas PCC) que sirven para configurar la operación de unas funciones específicas del plano de usuario de la pasarela P-GW (p.e., funciones que limitan la tasa de transferencia en bits/s de los servicios portadores) [8].

La entidad PCRF es accesible desde las plataformas de servicios externas como IMS mediante la interfaz Rx. Dicha interfaz ofrece la funcionalidad de control necesaria para que los servidores de aplicación externos puedan proporcionar información asociada a los servicios finales a los que accede el usuario junto con las características y requerimientos de QoS. A modo de ejemplo, si un usuario establece un servicio de videoconferencia a través de IMS, el elemento que controla la provisión del servicio en IMS puede indicar a través de la interfaz Rx cuáles son los parámetros de QoS que debe proporcionar el servicio portador de la red LTE para transferir de forma adecuada la información de la videoconferencia. Con esta información, la entidad PCRF envía a la red LTE las reglas PCC pertinentes para la configuración de los servicios portadores.

Veamos sus conexiones con otros nodos lógicos y sus principales funciones, en la siguiente imagen [7]:

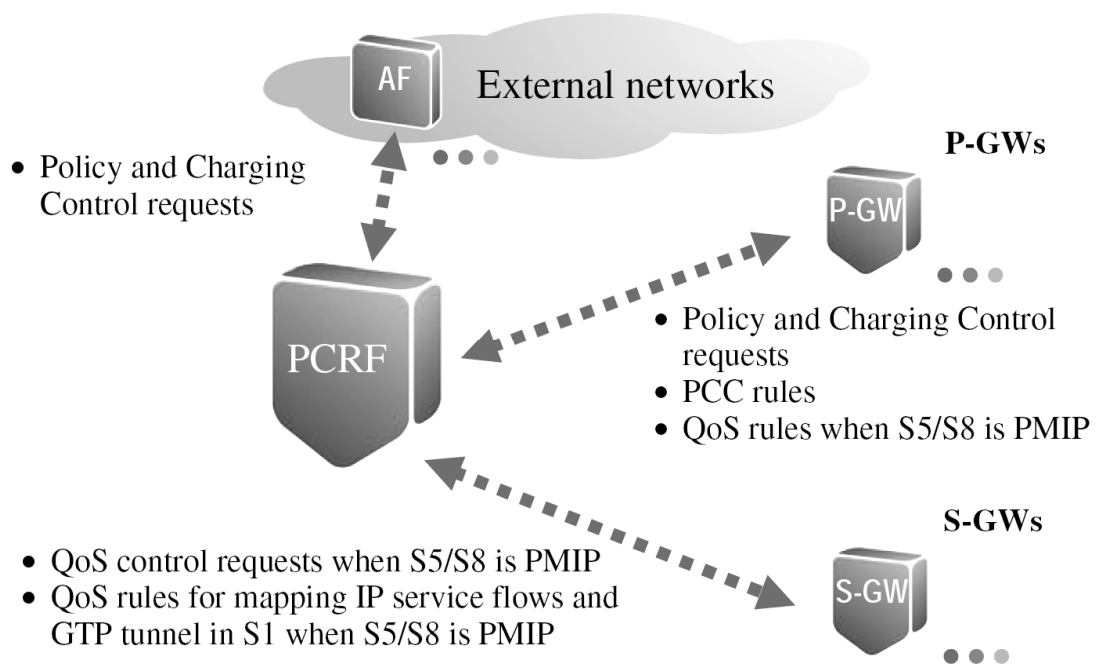


Figura 22. Conexiones del PCRF con otros nodos lógicos

2.3.2.7 HOME SUBSCRIPTION SERVER (HSS)

El HSS (*Suscripción Home Server*) es el repositorio de datos de suscripción para todos los datos de los usuarios permanentes. También se registra la ubicación del usuario en el nivel del nodo de control de la red visitada, como puede ser el MME [7].

El HSS almacena la copia maestra de los perfiles de abonado, que contiene información sobre los servicios que son aplicables a los usuarios, incluyendo información sobre las conexiones PDN permitidas, así como si el roaming a una determinada red está permitido. Para apoyar la movilidad entre redes no 3GPP, el HSS también almacena la identidad de los P-GWs que están en uso. La clave permanente, que se utiliza para calcular los vectores de autenticación que se envían a una red visitada para la autenticación de usuario y la obtención de claves para el cifrado y posterior protección de la integridad, se almacena en el Centro de autenticación (AuC), que suele ser parte de la HSS. En toda la señalización relacionada con estas funciones, el HSS interactúa con el MME. El HSS tendrá que ser capaz de conectar con cada MME de la red, donde sus UEs están autorizados a moverse. Para cada UE, los registros de HSS apuntarán al MME que esté prestando servicio en cada momento, y tan pronto como un nuevo MME informe que está dando servicio al UE, el HSS cancelará la ubicación del último MME.

2.3.2.8 DOMINIO DE SERVICIOS

El dominio de servicios puede incluir diversos sub-sistemas, que a su vez pueden contener varios nodos lógicos. La siguiente es una categorización de los tipos de servicios que estarán disponibles, y una breve descripción de qué tipo de infraestructura sería necesaria para proporcionarlos [7].

+ Servicios del operador basados en IMS (IMS - *Multimedia Sub-system*). El subsistema IP Multimedia (IMS - *Multimedia Sub-system*) es un mecanismo

operador puede utilizar para proporcionar servicios a través de SIP (Session Initiation Protocol).

+ Servicios del operador no basados en IMS: La arquitectura para servicios no basados en IMS no viene recogido en el estándar. El operador simplemente puede ubicar un servidor en su red, y los UEs se conectan a él a través de algún protocolo soportado por alguna aplicación instalada en el UE (por ejemplo un servicio de streaming de vídeo proporcionado desde un servidor).

+ Otros servicios no proporcionados por el operador de red móvil, por ejemplo, servicios prestados a través de Internet: Esta arquitectura no se trata en los estándares 3GPP, y la arquitectura depende del servicio en cuestión. La configuración típica sería que el UE se conecta a un servidor en Internet, por ejemplo, a un servidor web para los servicios de navegación web, o en un servidor SIP para el servicio de telefonía por Internet (por ejemplo, VoIP).

2.3.3 PRINCIPALES INTERFACES Y PROTOCOLOS LTE

Las principales interfaces en LTE son Uu, S1-MME, X2, U-S1, S11 y S5 [8].

+ LTE Uu: Ésta es la interfaz aire entre el UE y el eNodeB. La capa 1 LTE se abordará más adelante. RRC es el protocolo que se utiliza para la comunicación entre el UE y el eNodeB. Por encima de RRC, existe una capa NAS (*Non-Access Stratum*) dentro del plano de control. Esta capa NAS tiene como extremos al MME y al UE, siendo el eNodeB transparente a estos mensajes NAS.

+ LTE S1-MME: El eNodeNB y MME se comunican utilizando esta interfaz IP. S1-AP es la interfaz de capa de aplicación. El protocolo de transporte empleado aquí es SCTP (*Stream control transmission protocol*).

+ LTE X2: Esta interfaz es empleada por un eNodeB para comunicarse con otros eNodeBs. De nuevo, se trata de un interfaz IP. X2-AP es el protocolo de aplicación utilizado por eNodeB para comunicarse.

+ LTE S11: Se trata de interfaz IP entre el MME y el S-GW. GTPv2 es el protocolo utilizado en la capa de aplicación. GTPv2 se ejecuta sobre el protocolo de transporte UDP.

+ LTE S5: Esta es la interfaz entre el S-GW y P-GW. De nuevo se trata de una interfaz IP y tiene dos variantes: S5 puede ser una interfaz GTP o una interfaz PMIP. La variante PMIP se utiliza para dar soporte a redes de acceso que no son 3GPP.

+ LTE S1-U: Es la interfaz del plano entre el eNodeB y el S-GW GTP-U v1 es el protocolo de aplicación que encapsula la carga útil del UE. GTP-U se ejecuta sobre UDP.

Todas las interfaces IP anteriores pueden ser IPv4 o IPv6. Puede darse la circunstancia de que unos sean IPv4 y otros sean IPv6. Desde el punto de vista de las especificaciones no hay restricciones.

2.3.4 ARQUITECTURA PARA LA CONEXIÓN DE E-UTRAN CON UNA RED DE ACCESO 3GPP

La figura adjunta describe los elementos de la arquitectura que se ha de dar para que todas las redes de acceso 3GPP, E-UTRAN (LTE), UTRAN (UMTS) y GERAN (GSM), puedan estar conectadas a la EPC [7].

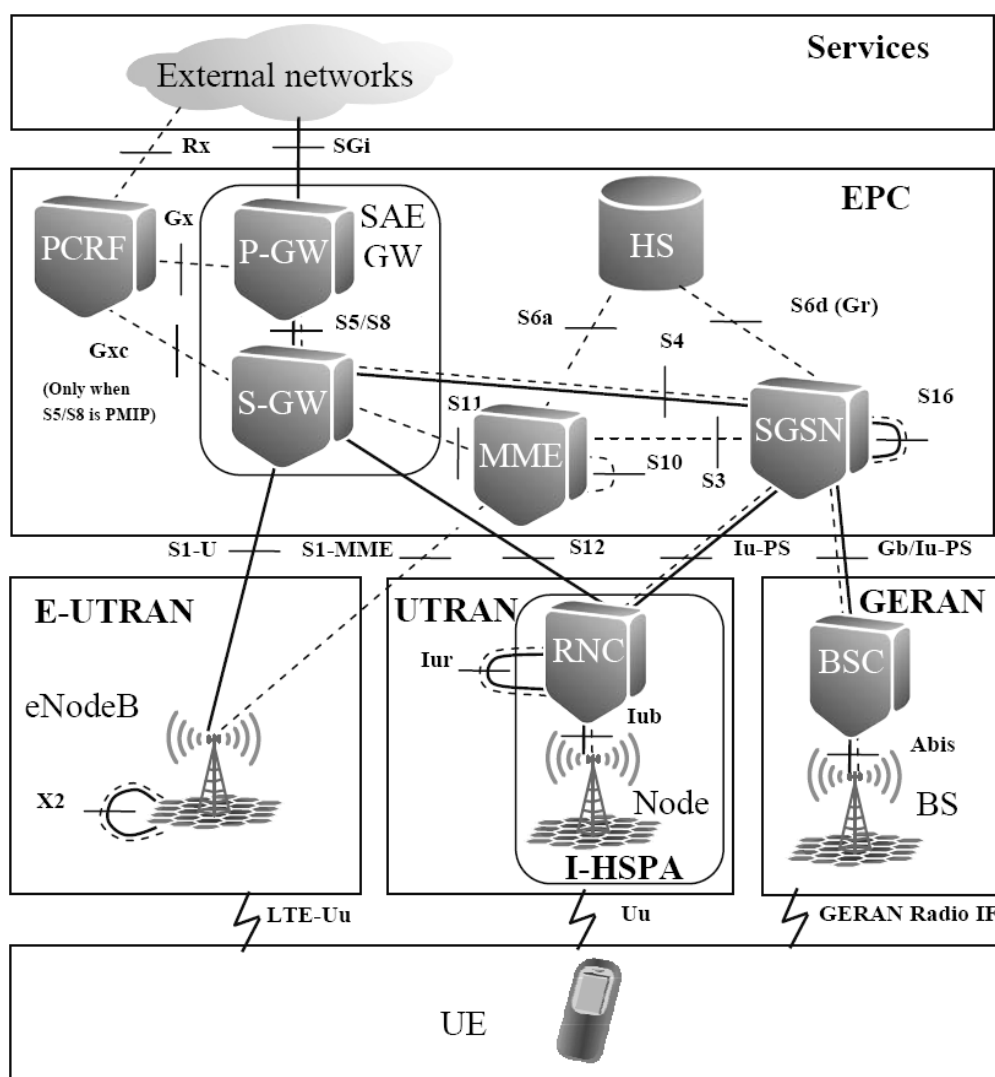


Figura 23. Elementos de la arquitectura

Funcionalmente, E-UTRAN, UTRAN y GERAN, proporcionan servicios de conectividad muy similares, especialmente cuando se mira la situación desde el punto de vista del usuario final, donde la única diferencia puede ser la velocidad de datos diferentes y un mejor rendimiento, pero arquitectónicamente estas redes de acceso son bastante diferentes, y muchos aspectos se llevan a cabo de manera distinta. Hay, por ejemplo, grandes diferencias en cómo los *bearers* (portadores) se gestionan en el EPS en comparación con las redes existentes con acceso UTRAN o GERAN. Sin embargo, cuando UTRAN o GERAN están conectadas al EPC, el S-GW simplemente asume el papel del GGSN (Gateway GPRS Support Node). Por tanto, redes de acceso 3GPP se comportan prácticamente de la misma manera a como se comportaban antes de trabajar conjuntamente entre sí. Las diferencias se hacen más visibles en el EPC, ya que lo que solía ser un GGSN fijo es ahora el S-GW que puede ser cambiado al producirse un cambio de SGSN debido a la movilidad de un UE.

El EPC necesita la adición de unas interfaces y funciones nuevas para conectarse y trabajar con redes de acceso UTRAN y GERAN. Las funciones

correspondientes también se requerirán en GERAN y UTRAN. Las nuevas interfaces son S3, S4 y S12 como se ve en la imagen anterior.

El eNodeB no interactúa directamente con las otras redes de acceso 3GPP, y la interacción hacia el EPC es la misma que en otros casos de movilidad que implique al EPC. Sin embargo, optimizar la interconexión significa que la red está controlando eventos de movilidad, tales como *handovers* (traspasos), y está provista de la funcionalidad de traspasar la comunicación con una mínima interrupción de los servicios. Esto significa que un eNodeB debe ser capaz de coordinar la medición de células UTRAN y GERAN por parte del UE, y llevar a cabo las decisiones de *handover* basadas en resultados de la medición; y por lo tanto los protocolos del interfaz radio E-UTRAN han sido diseñados para soportar estas nuevas funciones. Funcionalidades similares se requerirá de UTRAN y GERAN para soportar los *handovers* hacia la red E-UTRAN

2.3.5 ARQUITECTURA PARA LA CONEXIÓN DE E-UTRAN CON UNA RED DE ACCESO NO-3GPP

La interacción con redes de acceso NO-3GPP fue uno de los objetivos de diseño clave para el SAE, y para soportarlo, una especificación de arquitectura completamente separada fue desarrollada en el 3GPP. Esta especificación incluye un conjunto de soluciones dentro de dos categorías [7].

La primera categoría contiene un conjunto de soluciones genéricas de interconexión que pueden ser empleadas con cualquier otra red de acceso NO-3GPP. Las soluciones de movilidad que se definieron en esta categoría también se llaman "*Handovers* sin optimización", y los mismos procedimientos se aplican tanto en modo conectado como en modo *idle*.

La segunda categoría incluye una específica y una mayor interconexión con una determinada red de acceso, el CDMA2000 HRPD. Este grupo de soluciones también se conoce como "*Handovers* con optimización"; y específica procedimientos separados para el modo conectado y el modo *idle*.

2.3.5.1 Interconexión con cualquier red de acceso NO-3GPP

Para el primero de los casos, la figura siguiente describe la solución genérica de interconexión que se basa sólo en el acoplamiento con los interfaces genéricos que no sean interfaces a nivel de red de acceso. Puesto que hay tantos tipos diferentes de redes de acceso, se han clasificado en dos grupos; redes de acceso NO-3GPP *trusted* (fiable) y *un-trusted* (no fiable), dependiendo de si se puede suponer con seguridad que la autenticación definida por 3GPP puede ser ejecutada por la red, que hace que sea de confianza, o si la autenticación se tiene que hacer de manera superpuesta y la red de acceso es no fiable. El P-GW mantendrá la función de anclaje de movilidad, y las redes de acceso NO-3GPP están conectadas a él ya sea a través de la interfaz S2a o la interfaz S2b, dependiendo de si la red NO-3GPP es fiable o no. Ambas emplean para el control de la movilidad en capa 3 IP el protocolo PMIP. Para las redes que no soportan PMIP, el modo Client MIPv4 Foreign Agent está disponible como opción en S2a. Además de las funciones de movilidad, la arquitectura incluye interfaces para la autenticación del UE dentro y a través de las redes de acceso NO-3GPP, y también permite la funcionalidad de PCC través de las interfaces y

Gxa Gxb. A pesar de esto, las funciones y protocolos detallados para Gxb no están especificados en la *Release 8* [7].

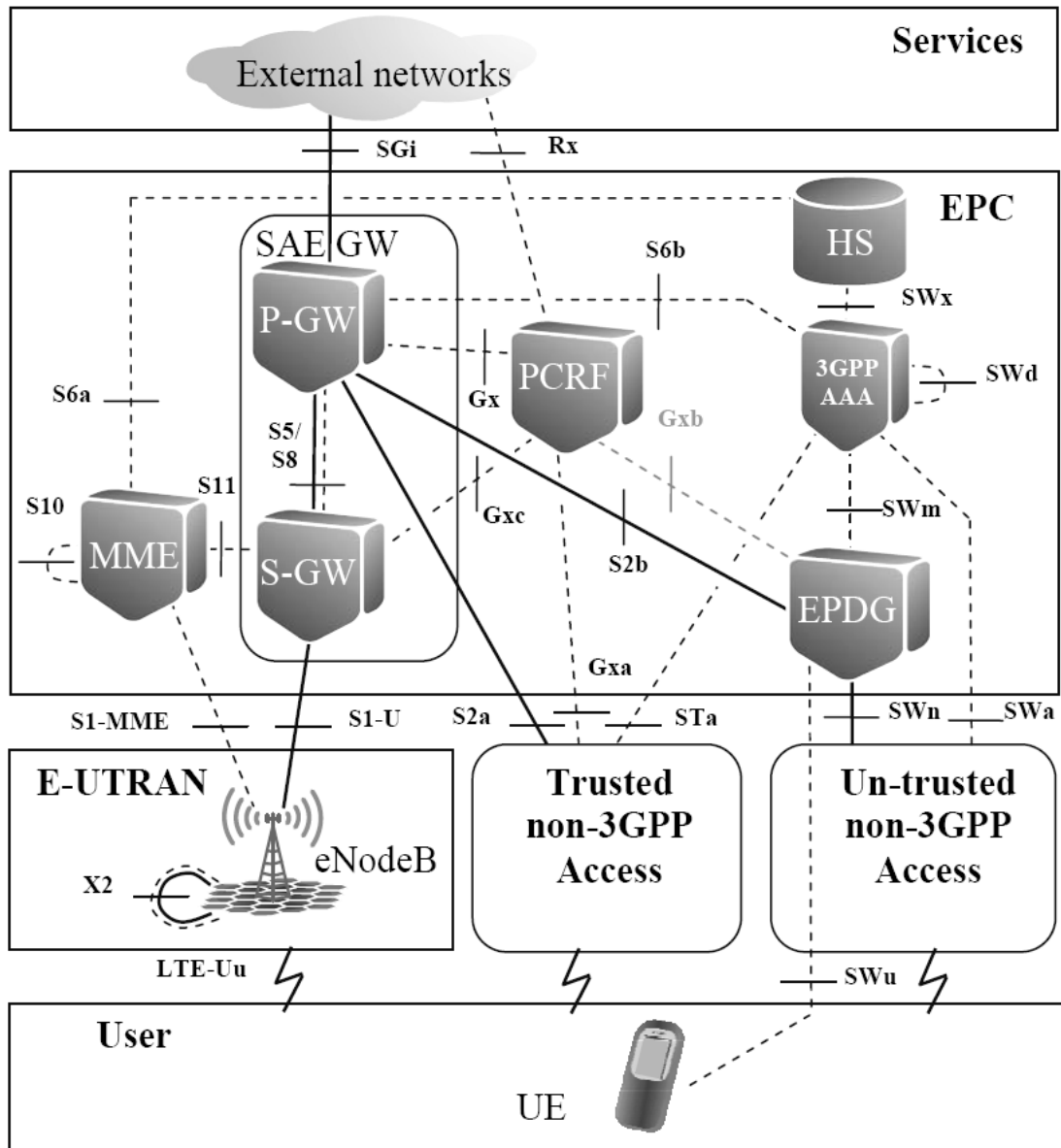


Figura 24. Acoplamiento con los interfaces genéricos

Además de las soluciones de control de la movilidad, una solución completamente centrada en el UE con DSMIPv6 también se incluye en las soluciones de trabajo para la interconexión. Este escenario se muestra a continuación.

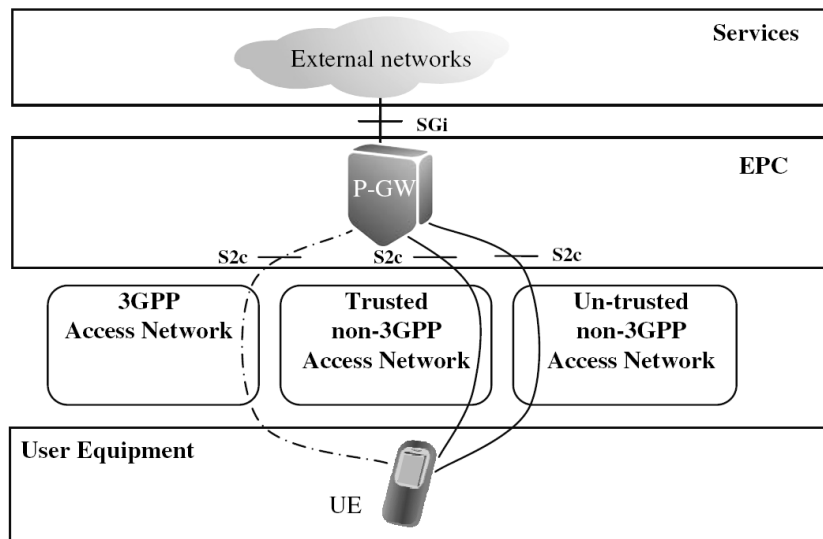


Figura 25. Control de la movilidad

En esta configuración, el UE puede registrarse en cualquier red de acceso NO-3GPP, recibirá una dirección IP a partir de ahí, y la registrará en el Home Agent en el P-GW. Esta solución considera la movilidad como una función superpuesta. Mientras que el UE es servido por una de las redes de acceso 3GPP, el UE se considera que está con un enlace local, y por lo tanto los gastos causados por los encabezados adicionales MIP son evitados.

2.3.5.2 Interconexión con una red de acceso CDMA2000

Para un óptimo rendimiento en la interconexión de 2 redes diferentes es necesaria una coordinación en las especificaciones sobre la forma de intercambiar la información que se pueda considerar crítica. Esto crea una solución específica que es válida sólo para las redes de acceso en cuestión. Con las limitaciones de tiempo y recursos con los que se disponía para el trabajo de estas especificaciones, el número de este tipo de soluciones en 3GPP Release 8 tuvo que ser limitado. Una solución con un alto grado de interconexión también requiere cambios en la red de acceso, y por definición el desarrollo de las redes de acceso NO-3GPP evidentemente no está bajo el control de 3GPP. El logro de una solución bien diseñada requiere una atención especial a la coordinación entre los organismos responsables de las diferentes estandarizaciones. Con estas dificultades, la Release 8 de 3GPP sólo incluye la optimización en el interconexión con la red de acceso CDMA2000 HRPD [7].

La figura que se muestra a continuación destaca la arquitectura para el interconexión para la tecnología CDMA2000 HRP. Se muestra la red HRPD Evolucionado (E-HRPD), donde una serie de modificaciones han sido aplicadas para que sea factible la conexión al EPC. Debido a estas modificaciones se llama E-HRPD, para poder así distinguirla de los sistemas HRPD que no son compatibles con estas funciones. La interfaz radio y la red de acceso radio se han mantenido lo más parecido posible, pero HRPD *Serving Gateway* (HSGW) es un nodo completamente nuevo que hereda muchas de sus funciones del S-GW.

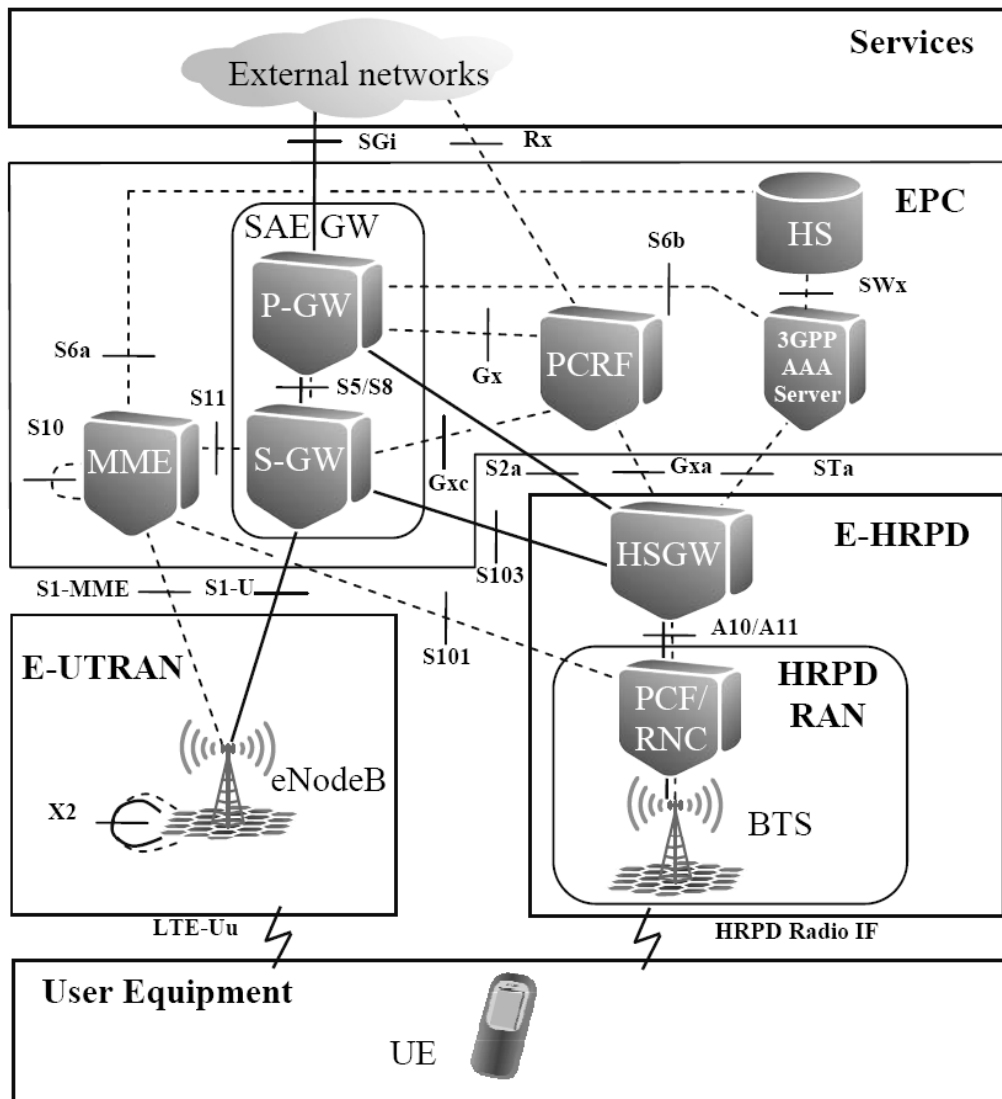


Figura 26. Arquitectura para el interconexión en CDMA2000 HRP

El E-HRPD es tratado como una red de acceso NO-3GPP fiable por lo que es conectado al EPC a través de los interfaces S2a, Gxa y STa.. Dado que la solución de interconexión está optimizada, y no se basa en el UE, para el procedimiento de conexión a la red destino se definen 2 nuevos interfaces: S101 y S103, para los planos de control (CP) y de usuario (UP) respectivamente.

2.4. PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS AL INTERFAZ AIRE

2.4.1 BÚSQUEDA DE CELDA

La primera acción que un dispositivo LTE lleva a cabo una vez se enciende es el de búsqueda de celda. Este procedimiento en LTE se basa en el uso de señales de sincronización; existiendo señales de sincronización primaria y secundaria. Los pasos de búsqueda de células son las siguientes [7]:

- El dispositivo buscará la señal de sincronización primaria en la banda de frecuencia en cuestión
- Tras detectar la señal de sincronización primaria, el UE buscará la señal de sincronización secundaria.

- Una vez que ha sido detectada una de las posibles señales de sincronización secundaria (existen 168 posibles señales), el UE puede descubrir el identificador de celda (*Physical Cell ID* - PCI) dentro de un espacio de 504 ID posibles.

Desde el momento que se obtiene el PCI, la UE tiene información sobre los parámetros utilizados por las señales de referencia en el *downlink*, y por tanto el UE puede decodificar el PBCH. Todo esto es independiente del ancho de banda actual del sistema en cuestión. Las especificaciones de la red LTE también soportan la planificación PCI automatizada como parte de la funcionalidad *Self Organization Networks* (SON).

2.4.2 ACCESO ALEATORIO

Se entiende por acceso aleatorio al procedimiento mediante el cual un terminal móvil se conecta a un determinado eNB. Este procedimiento se ejecuta por diversas razones [8]:

- Al acceder el terminal móvil a la red.
- Cuando el terminal móvil realiza un procedimiento de *handover*, es decir cuando a lo largo de una llamada, cambia de eNB
- Cuando el terminal móvil realiza procedimientos de reelección de celda.
- Como resultado de una llamada entrante, etc.

La operación de acceso aleatorio en LTE se basa en el uso de preámbulos y una rampa de potencia empleada en dichos preámbulos [7]. La potencia inicial se basa en la pérdida de señal medida en el trayecto descendente, y la rampa de potencia es necesaria debido a la precisión relativamente elevada del UE a la hora de estimar dichas pérdidas y calcular el valor de potencia que compense el desvanecimiento de enlace ascendente. Los pasos de este procedimiento en la capa física son los siguientes:

- Transmitir un preámbulo empleando recursos PRACH y con la potencia seleccionada por la subcapa MAC
- Esperar la respuesta RACH con información del preámbulo localizado (recurso PRACH y la secuencia de preámbulo). Además de la información de preámbulo, la respuesta también contiene información sobre el recurso de enlace ascendente para futuros intercambios de información, así como el "*timing advance*" (lo veremos a continuación) que se utilizará.
- Si la petición de acceso aleatorio no encuentra respuesta, se vuelve a transmitir el preámbulo en el próximo recurso PRACH disponible de acuerdo a las instrucciones de la subcapa MAC

En el sistema LTE se definen dos tipos distintos de procedimientos de acceso [8]:

- Acceso basado en contienda, que aplica de forma general, es decir tanto a los procesos de acceso general, transferencia de llamada (*handover*),

transferencia de información en UL para establecer los mecanismos de *scheduling*, cuando no están disponibles canales del tipo PUCCH o bien cuando hay datos a transmitir en el enlace ascendente o descendente y el terminal móvil ha perdido la sincronización (debido a mecanismos de ahorro de batería o *power saving*).

- Acceso regulado (no basado en contienda), que sólo aplica en los procedimientos de *handover*.

La diferencia entre uno y otro radica que en el segundo caso no hay posibilidad de colisión de la secuencia preámbulo.

Se anexa a continuación diagrama con los pasos que sigue cada tipo de acceso mencionado, constatándose sus diferencias [7]:

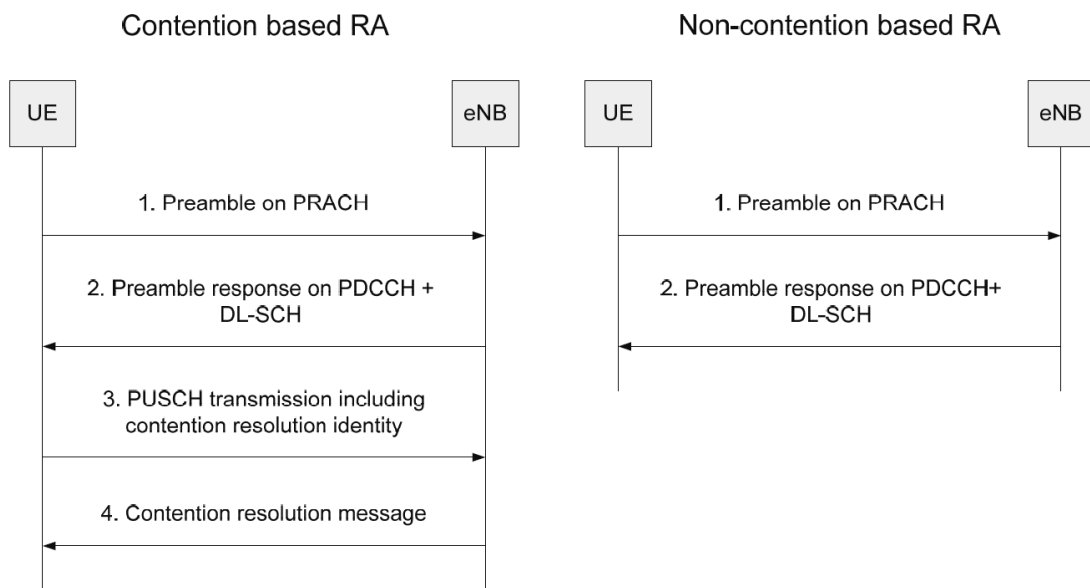


Figura 27. Diagrama para cada tipo de acceso

2.4.3 HYBRID-ARQ (HARQ)

HARQ se refiere a cualquier combinación de FEC+ARQ.

FEC (Forward Error Correction).- [10] es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. La posibilidad de corregir errores se consigue añadiendo al mensaje original unos bits de redundancia. Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos

ARQ (Automatic Repeat-reQuest).- [11] son protocolos utilizados para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos. Estos suelen utilizarse en sistemas que no actúan en tiempo real ya que el tiempo que se pierde en el envío puede ser considerable y ser más útil emitir mal en el momento que correctamente un tiempo después. Esta técnica de control de errores se basa en el envío de los paquetes de información que se detecten como erróneos.

En HARQ [12] las tramas erradas que no puedan ser corregidas por FEC no se descartan, sino que se guardan para ser combinadas con sucesivas tramas

erradas y producir una trama correcta. HARQ es muy efectivo en ambientes ruidosos donde la cantidad de errores supera lo que el FEC puede corregir. Aquellos paquetes que después del FEC sigan con errores, deben solicitarse su retransmisión y las nuevas versiones son combinadas con las anteriores para tener mayor probabilidad de obtener un paquete sin errores.

La idea general del HARQ es que en dos paquetes sucesivos que transporten la misma información, la probabilidad de tener los mismos bits errados es baja, entonces al tener dos o más copias del mismo paquete errado hay una alta probabilidad de poder reconstruir un paquete sin errores a partir de varios errados.

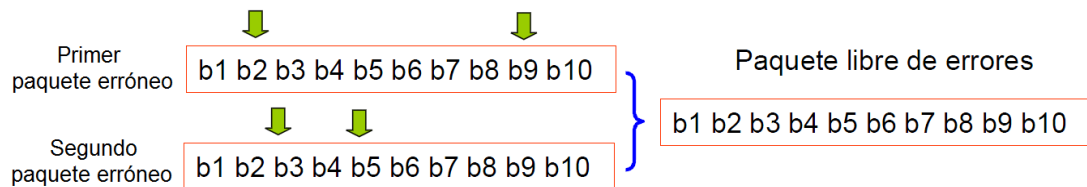


Figura 28. Reconstrucción de un paquete sin errores

El HARQ en LTE se basa en el uso de un procedimiento HARQ *stop-and-wait* (no se envía la siguiente trama hasta tener confirmación de la anterior) [7]. Una vez que el paquete es transmitido desde el eNodeB, el UE lo decodificará y proporcionará *feedback* mediante el canal PUCCH. De ser negativa la confirmación (NACK), el eNodeB enviará una retransmisión. El UE combinará la retransmisión con la transmisión original y se ejecutará un mecanismo de turbodecodificación de nuevo. Suponiendo una decodificación exitosa (basada en CRC), el UE enviará una confirmación positiva (ACK) hacia el eNodeB. Después de esto, el eNodeB enviará un nuevo paquete HARQ. Debido al modo de operación *stop-and-wait*, se necesita tener varios procesos HARQ para obtener un flujo continuo de datos. En LTE el número de procesos se fija a 8 tanto en el enlace ascendente como en el descendente. Un ejemplo de una transmisión continua para un usuario se ilustra en la figura siguiente. Para múltiples usuarios, depende del *scheduler* del eNodeB cuando una retransmisión se envía en el *uplink* o en el *downlink*, ya que la retransmisión también requiere que se asignen recursos [7].

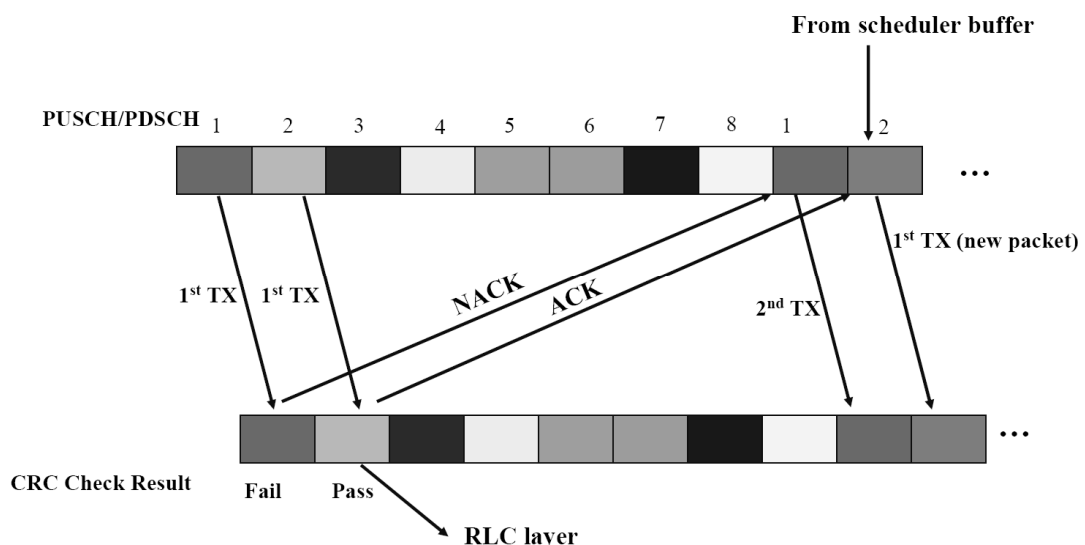


Figura 29. Transmisión continua para un usuario

La operación HARQ en LTE es compatible con el *soft combining* y con el uso de la redundancia incremental. El uso del soft combinig significa que la retransmisión tiene exactamente los mismos parámetros de la transmisión original y por lo tanto se transmiten exactamente los mismos símbolos. Para la redundancia incremental, la retransmisión puede tener diferentes parámetros que la transmisión original.

El retardo mínimo entre el final de un paquete y el comienzo de una retransmisión es de 7 ms. El UE enviará el ACK/NACK para un paquete de la trama n , en la trama $n+4$ del *uplink*. Esto deja alrededor de 3 ms de tiempo de procesamiento en el UE, dependiendo del *timing offset* para el *uplink/downlink* controlado por el procedimiento de *timing advance* que veremos un poco más adelante. El tiempo de bajada de un paquete único transmitido en el *downlink* se muestra en la figura siguiente. El instante de la retransmisión en el *downlink* está sujeto al *scheduler* en el eNodeB y por lo tanto el tiempo se muestra en la figura es momento más temprano para que una retransmisión pueda producirse [7].

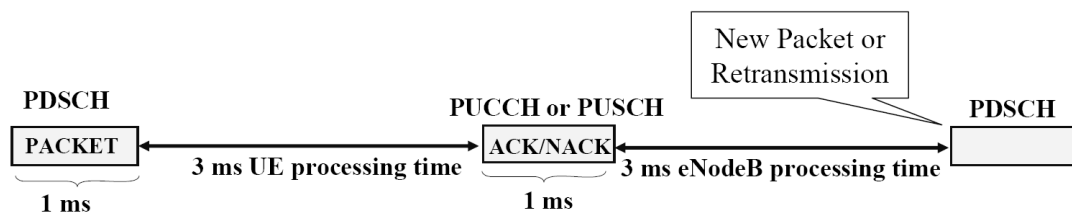


Figura 30. Timing LTE HARQ para un único paquete en *downlink*

2.4.4 TIMING ADVANCE

El procedimiento de control de tiempo es necesario para que las transmisiones en el *uplink* de los diferentes usuarios lleguen al eNodeB esencialmente dentro del prefijo cíclico (se verá posteriormente) [7]. De este modo, la sincronización en el *uplink* es necesaria para evitar interferencias entre los usuarios con las transmisiones del *uplink* previstas en la misma subtrama. El eNodeB mide continuamente la sincronización de la señal de *uplink* procedente del UE y ajusta el tiempo de transmisión del *uplink*. Los comandos de *Timing Advance* sólo se envían cuando un ajuste de tiempo es realmente necesario. La resolución de un comando de *Timing Advance* es de $0,52 \mu\text{s}$, y el *timing advance* es definido en relación con el momento en que la trama del *downlink* es recibida en el UE.

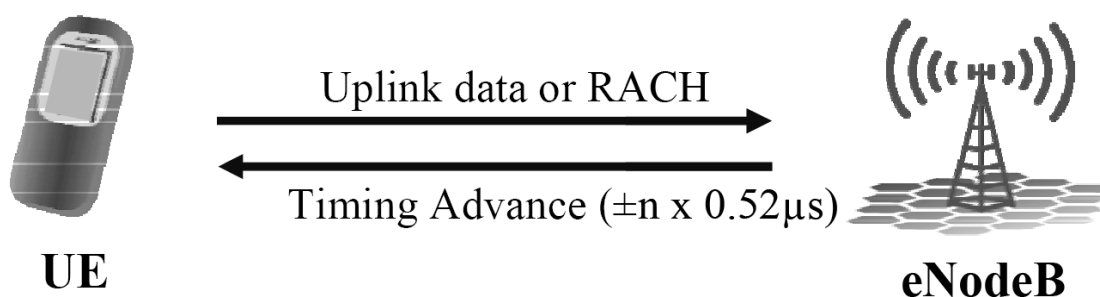


Figura 31. Timing Advance

El valor de *timing advance* se mide desde la transmisión RACH cuando el UE no tiene un *timing advance* válido, es decir, el *uplink* del UE no está sincronizado. Estas situaciones se producen durante el acceso al sistema, cuando el UE se

encuentra en estado RRC_IDLE o cuando el UE ha tenido un período de inactividad superior al marcado por el temporizador correspondiente, cuando ocurre un *handover* no sincronizado, y después de un fallo de enlace radio. Para el rango definido de *timing advance*, podríamos hablar de un rango de celda de hasta 100 km, e incluso más allá al dejar algunos recursos sin uso.

2.4.5 CONTROL DE POTENCIA

Para LTE, el control de potencia es lento para el *uplink*. En el *downlink* no hay control de potencia [7]. A medida que el ancho de banda varía de acuerdo a las variaciones del tipo de datos, la transmisión de potencia por parte del UE también va a cambiar. El control de potencia ahora no controla realmente la potencia "absoluta", sino más bien de la densidad espectral de potencia (PSD), potencia por Hz, para un dispositivo concreto. Lo que facilita el uso de una velocidad más lenta para el control de potencia es el uso de los recursos ortogonales en el *uplink* de LTE, lo que evita el problema de cerca-lejos que requiere un rápido control de potencia en WCDMA. La motivación clave para el control de potencia es reducir el consumo de alimentación del terminal y también evitar un rango dinámico demasiado grande en el receptor eNodeB, más que reducir la interferencia como ocurría en sistemas anteriores (GSM, WCDMA,...). En el receptor, la densidad espectral de potencia de los diferentes usuarios han de estar razonablemente cerca unos de otros por lo que el convertor A/D del receptor tiene unos requisitos razonables y también la interferencia resultante de la forma no-ideal del espectro del transmisor del UE se mantiene bajo control. El principio del control de potencia en el *uplink* de LTE se ilustra en la figura siguiente, donde para un cambio de velocidad de datos. La densidad espectral de potencia PSD se mantiene constante, pero la potencia total de transmisión resultante se ajusta en relación a las variaciones en la velocidad de los datos [7].

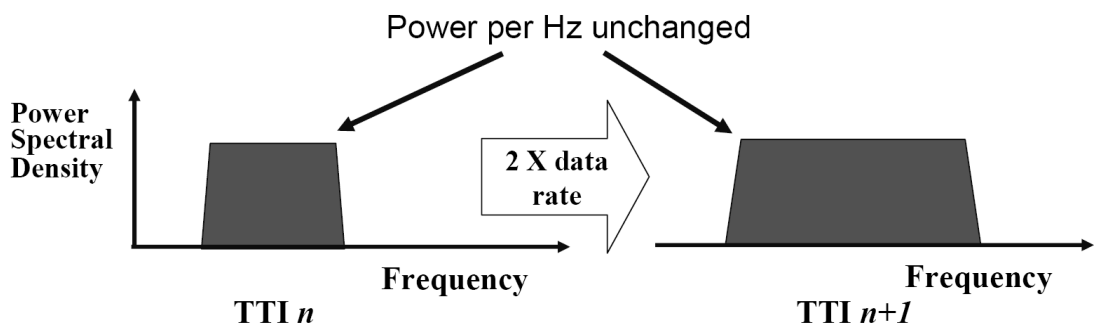


Figura 32. Ajuste de potencia

El actual control de potencia se basa en la estimación de la pérdida en el camino (*path loss*), teniendo en cuenta parámetros específicos de la celda y aplicando luego un valor (acumulado) del factor de corrección recibido del eNodeB. Dependiendo de la configuración de los parámetros de capas superiores, el comando de control de potencia es 1 dB hacia arriba o abajo, o bien se aplica el conjunto de pasos [-1 dB, 0, +1 dB, +3 dB]. Las especificaciones también incluyen el control de potencia basada en valor absoluto, pero no está previsto que se emplee en las redes primera fase. El rango dinámico total de control de potencia es ligeramente menor que en WCDMA y los dispositivos ahora tienen un nivel mínimo de potencia de -41 dBm frente a los -50 dBm de WCDMA.

2.4.6 PAGING (Mecanismo de aviso)

El principal propósito de este procedimiento es [8]:

1. Llamar o despertar a los terminales móviles que se encuentran en estado de espera (*Idle*) a nivel de capa RRC.
2. Informar a terminales móviles activos (*RRC connected*) de cambios en el sistema de información o de notificaciones de emergencia.

Cuando el terminal móvil utiliza mecanismos de recepción discontinua DRX (se verá en el apartado Gestión de recursos) para reducir el consumo de potencia, es decir opera en modo *Idle*, debe despertarse periódicamente para monitorizar el canal de control PDCCH y verificar si lleva el indicador de aviso que indica en qué recursos físicos (PRBs) del canal PDSCH se encuentra la información de aviso (i.e., *paging*). Para ello almacena un valor por defecto del denominado *paging cycle*, es decir de periodicidad del aviso y el número de grupo de aviso (i.e., *paging group*), valores transmitidos por el canal de radiodifusión (BCCH), y calcula los números de las tramas y subtramas en donde debe despertarse y acceder a la información de aviso o *paging*.

2.5. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO (Radio Resource Management RRM)

Como es sabido, la interfaz radio ha de soportar el acceso de un número elevado de usuarios a través de servicios de distinta índole, y con unos requerimientos de calidad de servicio (*Quality of Service: QoS*) que se deben garantizar en todo momento independientemente del dinamismo del sistema. El incumplimiento por parte del operador de los requisitos de QoS podría provocar el descontento de sus abonados y por lo tanto una pérdida clara de negocio.

En un intento por respetar la calidad de servicio, el operador podría optar por sobredimensionar el número de recursos radio disponible. Sin embargo, esta estrategia no resulta adecuada en el ámbito de las comunicaciones móviles debido a que los recursos radio son, en general, escasos y caros. En su lugar, se debe gestionar dinámicamente la interfaz radio incorporando a la red acceso un conjunto de funciones que permitan controlar y gestionar de manera eficiente los recursos radio con el mínimo sobredimensionado posible. De manera general, a ese conjunto de funciones se le denomina "Gestión de Recursos Radio" o "*Radio Resource Management*" (RRM) [8].

La gestión de recursos radio se encarga, por un lado, de racionalizar el uso de los recursos radio como frecuencias, ranuras temporales (*time slots*), potencia, o códigos según la tecnología de acceso radio, al mismo tiempo que se permite el acceso al mayor número de usuarios posible. Por otro lado, se responsabiliza de garantizar unos determinados niveles mínimos de calidad de servicio, asociados con cada uno de los servicios establecidos en el segmento radio, como paso intermedio para conseguir un cierto nivel de calidad de servicio extremo a extremo. La consecución simultánea de estos objetivos no es sencilla, ya que, el uso eficiente de recursos, la maximización de la capacidad, y el logro de la calidad de servicio suele ir en direcciones opuestas. Es por ello que la gestión de recursos radio no es una función única, sino que se compone de varias funciones que se encargan de gestionar distintos aspectos de la interfaz

radio, y cuya ejecución, permite en conjunto, la consecución de los distintos objetivos.

A continuación se describirán las principales funciones RRM contempladas por LTE

2.5.1 CONTROL DE ADMISIÓN

El algoritmo de control de admisión del eNodeB decide si las solicitudes para nuevos portadores *Evolved Packet System* (EPS *Bearer*) en la celda se concedan o rechacen [7]. El control de admisión (AC) tiene en cuenta la situación de los recursos en la célula, los requisitos de QoS para el nuevo EPS *bearer*, así como los niveles de prioridad, y la QoS que actualmente se proporciona a las sesiones activas en la célula. Sólo se concede una nueva solicitud si se estima que la calidad de servicio para el nuevo EPS *Bearer* se puede garantizar, sin dejar de ser capaz de proporcionar un servicio aceptable a las actuales sesiones en curso de la célula con la misma prioridad o superior. Por lo tanto, el algoritmo de control de admisión tiene como objetivo sólo admitir nuevos EPS *Bearer*s hasta el punto de que el *scheduler* de paquetes en la célula puede converger a una solución viable, donde los requisitos de QoS prometidos estén garantizados por lo menos para todos los beares (portadores) con alta prioridad. Las reglas de decisión exacta y los algoritmos para el control de admisión son específicos del proveedor del eNodeB y no están especificados por el 3GPP.

Cada EPS *Bearer* de LTE tiene un conjunto de parámetros asociados a la QoS. Todos los paquetes dentro del *Bearer* tienen el mismo tratamiento de QoS. Es posible modificar los parámetros de calidad de servicio de los *bearers* existentes de forma dinámica. También es posible activar otro *bearer* paralelo para permitir diferentes perfiles de QoS de diferentes servicios de forma simultánea. El nuevo portador puede ser iniciado por el UE o por el núcleo de la red de paquetes.

El perfil de QoS del EPS *Bearer* consta de los siguientes parámetros [7]:

- *allocation retention priority* (ARP)
- *uplink and downlink guaranteed bit rate* (GBR)
- *QoS class identifier* (QCI).

El parámetro GBR sólo se especifica para los EPS *Bearers* GBR. Para los non-GBR *bearers*, se especifica un Agregate MBR (AMBR). El parámetro ARP, el cual es un número entero en el rango de 1-16, se emplea principalmente para la priorización en la realización de las decisiones de control de admisión. El QCI es un puntero a un conjunto más detallado de los atributos de QoS. El QCI incluye parámetros como el retardo de paquetes de capa 2, la tasa de pérdida de paquetes y la prioridad de *sheduling*.

Las especificaciones 3GPP definen una tabla de asignación de nueve QCIs diferentes y sus servicios típicos, tal y como muestra la siguiente tabla. Se pueden definir en un futuro valores de QCI en función de las necesidades y de los nuevos servicios emergentes [7].

QCI #	Priority	L2 packet delay budget	L2 packet loss rate	Example services
1 (GBR)	2	100 ms	10^{-2}	Conversational voice
2 (GBR)	4	150 ms	10^{-3}	Conversational video
3 (GBR)	5	300 ms	10^{-6}	Buffered streaming
4 (GBR)	3	50 ms	10^{-3}	Real-time gaming
5 (non-GBR)	1	100 ms	10^{-6}	IMS signaling
6 (non-GBR)	7	100 ms	10^{-3}	Live streaming
7 (non-GBR)	6	300 ms	10^{-6}	Buffered streaming, email,
8 (non-GBR)	8	300 ms	10^{-6}	browsing, file download,
9 (non-GBR)	9	300 ms	10^{-6}	file sharing, etc.

Tabla 6. Asignación QCIs

Un parámetro adicional de QoS llamado "*prioritized bit rate*" (PBR), se especifica por *Bearer* para el *uplink*. El PBR se introduce para evitar el llamado problema "hambre de *scheduling*" en el *uplink* que puede ocurrir para UE con múltiples *bearers*. Una simple funcionalidad de control de tasa por *bearer* es introducida para la compartición de recursos del *uplink* entre varios radio *bearers*. RRC controla la velocidad del *uplink*, dando a cada *bearer* una prioridad y un PBR. El control de la tasa de subida (*uplink*) asegura que el UE sirve sus *radio bearer(s)* en la siguiente secuencia [7]:

- todos los *radio bearer(s)* en orden decreciente de prioridad de sus PBR;
- todos los *radio bearer(s)* en orden decreciente de prioridad de sus recursos restantes

Cuando el PBR se pone a 0 para todos los RBs, el primer paso se omite y los radio *bearers* se atienden en estricto orden de prioridad.

LTE también permite que la red active un *non-GBR Bearer* sin necesidad de que la aplicación del terminal inicie la solicitud. Hay, sin embargo, también más necesidad de una buena implementación de QoS en LTE dado que no son posibles las conexiones de conmutación de circuitos; y la voz por ejemplo es transportada como Voz sobre IP (VoIP).

2.5.2 SCHEDULING DE PAQUETES

El *scheduling* de paquetes en LTE consiste en asignar de forma dinámica recursos radio a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones ordenadamente a través de la interfaz radio LTE [8]. El *scheduling* conlleva varias subtarefas como decidir, qué usuarios van a transmitir, en qué recursos de la interfaz radio, y con qué formato de modulación y codificación. Para ello, el *scheduling* de paquetes considera los requerimientos de calidad de servicio asociados a los servicios portadores radio, la calidad del canal para cada terminal, el estado de los *buffers*, etc

El *scheduling* está muy relacionado con las características de la interfaz radio LTE. Ésta define una rejilla tiempo-frecuencia de recursos radio tal y como se muestra en la siguiente figura, donde el mínimo recurso radio asignable a un usuario es un bloque de 180 kHz en una subtrama de 1 ms, denominado "*Physical Resource Block*" (PRB). Esta alta granularidad de la interfaz LTE permite que el *scheduler* pueda reaccionar a las rápidas variaciones del canal radio [8].

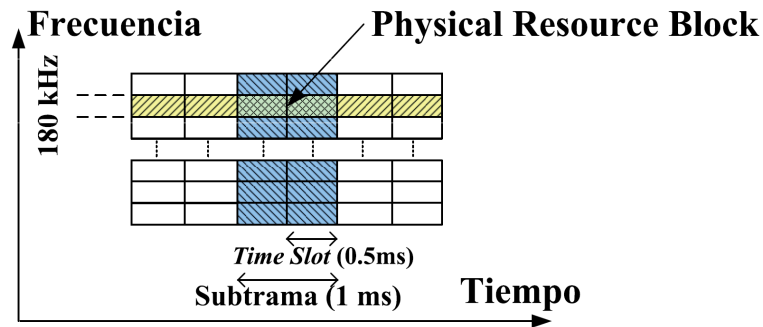


Figura 33. Scheduling en el dominio temporal

En el dominio temporal, es posible explotar la llamada diversidad multiusuario, donde, debido a la existencia de varios usuarios, es más probable que alguno de ellos experimente una buena calidad del canal en una determinada subtrama. Así, si el *scheduler* tiene en cuenta el estado del canal de cada usuario (*channel-aware scheduling*), podría asignar el canal al usuario con mejor calidad y de este modo se podría aprovechar mejor los recursos radio. Esta mejora por diversidad multiusuario es tanto mayor cuanto mayor es el número de usuarios y más rápidas son las variaciones del canal.

LTE permite además extender este concepto al dominio de la frecuencia, donde ahora se tienen en cuenta las variaciones del canal debido a los desvanecimientos selectivos en frecuencia. En la figura adjunta se representa el canal para dos usuarios. Se aprecia que tanto en frecuencia como en el tiempo el canal es percibido de manera diferente por cada usuario, de forma que si se selecciona convenientemente el usuario a transmitir, entonces es posible que el sistema trabaje más eficientemente [8].

Representación del canal percibido por 2 usuarios

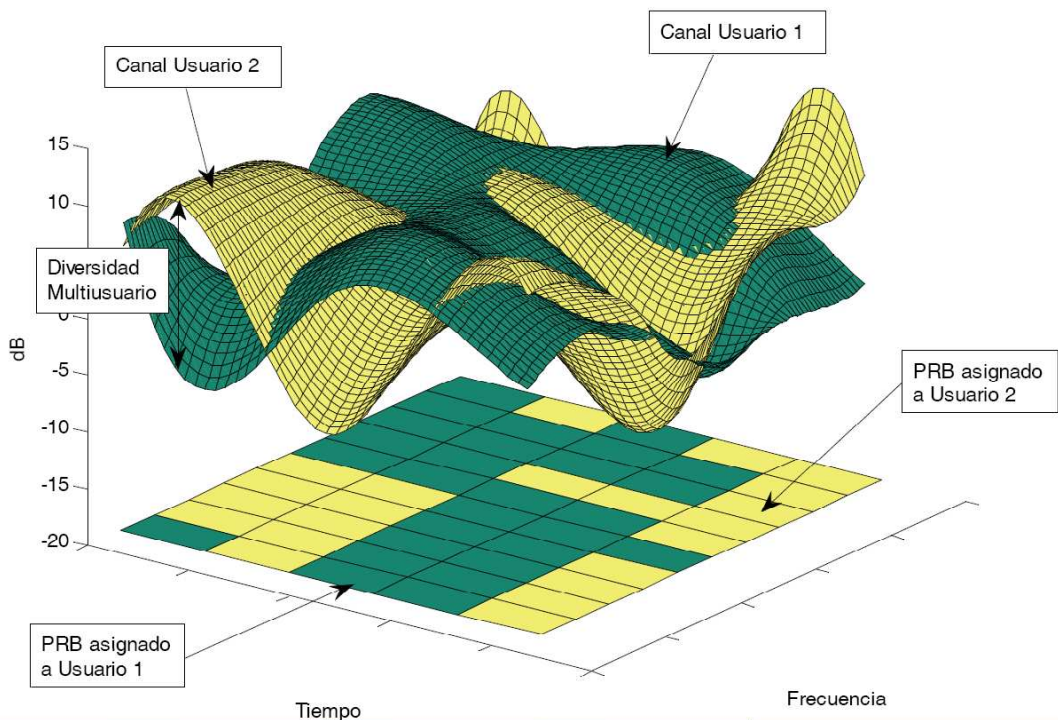


Figura 34. Canal para dos usuarios

En LTE el *scheduling* reside en el eNB, tanto para el DL como para el UL. Este mecanismo centralizado asegura ortogonalidad en las transmisiones, aunque

requiere de señalización entre los usuarios y el eNB para reportar, entre otras cosas, el estado del canal y del *buffer*.

La figura que se muestra bajo estas líneas muestra la arquitectura para el *scheduling* en LTE, donde se distingue entre un *scheduler* para el DL (*downlink scheduler*) y otro para el UL (*uplink scheduler*) [8].

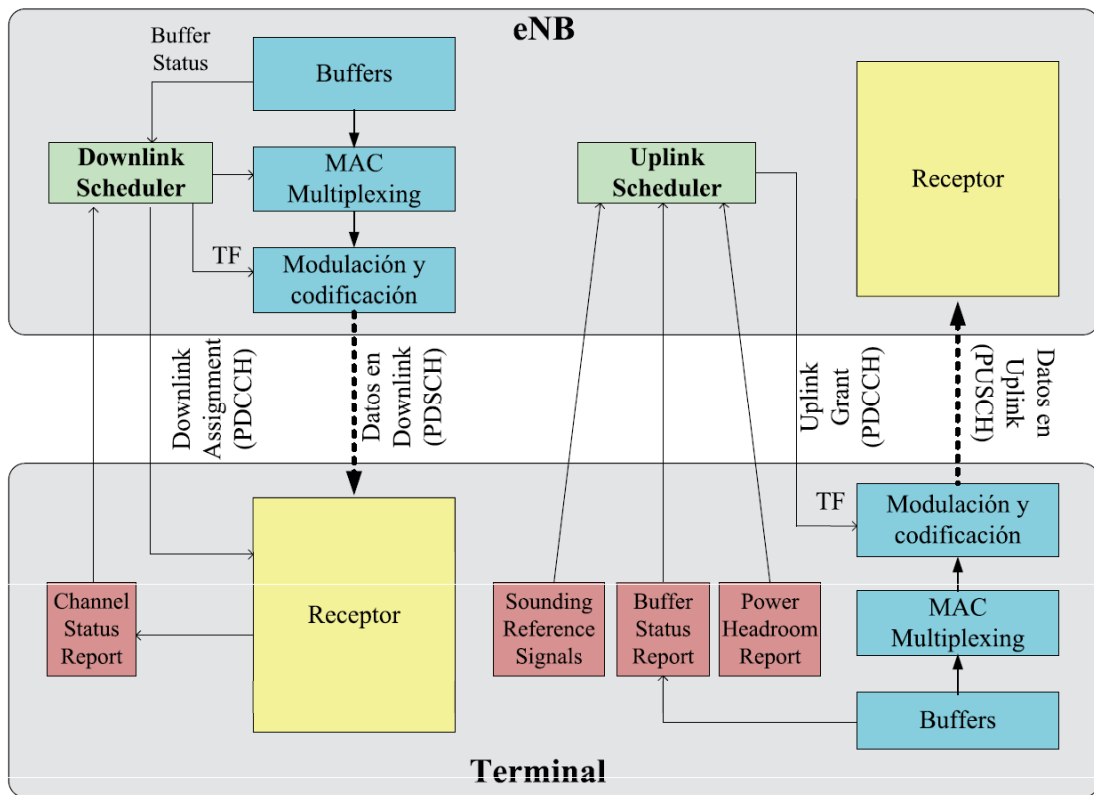


Figura 35. Arquitectura para el *scheduling* en LTE

En el enlace descendente, el *downlink scheduler* se encarga de decidir qué usuarios transmiten en el canal PDSCH, cómo se multiplexan sus canales lógicos (*MAC multiplexing*), y con qué formato de transporte (TF), que determina el tamaño del bloque de transporte (TB), y la modulación y codificación a emplear. Para ello, el *scheduler* necesita que los terminales reporten el estado del canal mediante *channel status reports*.

En el enlace ascendente, de manera similar al enlace descendente, el *uplink scheduler* ubicado en el eNB determina qué terminales transmiten en el PUSCH en cada subtrama y en qué PRB. Adicionalmente, el *uplink scheduler* se encarga de seleccionar el TF que el terminal debería usar, mientras que las funciones de multiplexado de canales lógicos (*MAC multiplexing*) se realizan en el terminal. Tanto la decisión de *scheduling* como el TF seleccionado se comunican al terminal mediante los llamados *uplink scheduling grants*. Sin embargo, para seleccionar adecuadamente el TF, el eNB necesita conocer con precisión el estado del canal, el estado del *buffer*, y la disponibilidad de potencia en el terminal. Como se verá a continuación, el estándar define mecanismos específicos para que el terminal pueda proporcionar esta información.

2.5.2.1.- INFORMACIÓN DE CANAL

Para realizar *channel aware scheduling* es necesario que el *scheduler* tenga una estimación del canal para cada usuario tanto en DL como en UL [8].

En lo que respecta a la estimación del canal en DL, el eNB configura a los terminales para que le envíen *channel status reports* (CSR) de todo el ancho de banda de *scheduling* o de una determinada subbanda.

En el UL, el eNB puede conseguir la estimación del canal simplemente analizando la señal recibida en los PRBs asignados a un determinado usuario para la transmisión. Sin embargo, esto requiere que el terminal esté transmitiendo (tenga *uplink grants*) y no aporta información con respecto al resto de PRBs no asignados. Para ello, el eNB puede configurar a los usuarios activos para que transmitan unas señales específicas denominadas *Sounding Reference Signals* (SRS) que permiten estimar el canal en cualquier PRB

2.5.2.2 INFORMACIÓN DE ESTADO DE BUFFER

Las estrategias de *scheduling* deben tener en cuenta el estado de los *buffers* a la hora de realizar la asignación de recursos [8]. Por ejemplo, no tendría sentido asignar recursos en una subtrama a un terminal con un excelente canal pero que no tiene información a transmitir. En el caso del DL, el *scheduler* conoce exactamente el estado de los *buffers* en el eNB. Sin embargo, en el caso del UL, el estándar ha definido una serie de mecanismos para que el terminal pueda reportar al *uplink scheduler* en el eNB el estado de sus *buffers*.

Un terminal puede reportar a la red el estado de sus *buffers* en cada subtrama mediante el *Buffer Status Report* (BSR). Este mensaje se incluye en la señalización de control en la cabecera MAC durante las transmisiones en el PUSCH (señalización en banda). Un BSR indica la cantidad de datos esperando en los *buffers* del terminal para cada canal lógico

2.5.2.3 INFORMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE POTENCIA

En LTE, se define la disponibilidad de potencia como la diferencia entre la potencia máxima en el transmisor y la potencia nominal de transmisión necesaria para asegurar la correcta recepción de los datos con un determinado formato de modulación y codificación [8]. Cada formato de modulación y codificación funciona correctamente bajo unas condiciones mínimas de calidad de la señal recibida, que a su vez depende de la potencia transmitida. Por lo tanto, a la hora de hacer el *scheduling*, el *scheduler* (DL o UL) en el eNB debe conocer la disponibilidad de potencia en el transmisor para seleccionar adecuadamente el formato de modulación y codificación

En lo referente al DL, la información de disponibilidad de potencia es conocida por el *downlink scheduler* ya que éste reside en el mismo eNB donde se encuentra el transmisor, y la potencia total de transmisión es típicamente constante.

En cuanto al UL, se hace necesaria la comunicación entre el terminal y el eNB donde reside el *uplink scheduler*, con lo que LTE estandariza un mecanismo por el cual el terminal puede informar al eNB de su disponibilidad de potencia en un mensaje denominado *power headroom*. Al igual que los mensajes de estado del *buffer*, este mensaje se encuentra en la cabecera MAC en las transmisiones a través del PUSCH.

2.5.2.4. ADAPTACIÓN DINÁMICA DEL ENLACE

Una de las subtareas del *scheduler* en LTE es la selección del formato de modulación y codificación más adecuado en todo momento para las transmisiones de cada usuario [8]. A este proceso de decisión se le denomina "adaptación dinámica del enlace". En LTE se implementa un mecanismo de adaptación dinámica del enlace basado en control de la tasa binaria (*rate control*), que consiste en ir variando la tasa binaria asignada a un usuario activo en función de la calidad del canal. Así, el usuario percibirá una tasa binaria alta si la calidad del canal es buena, y baja si la calidad del canal es mala.

La adaptación dinámica del enlace se basa en la estimación de la calidad del canal que, para el UL, se obtiene a partir de la recepción de las *Sounding Reference Signals* (SRS) y, para el DL, viene dada en la información contenida en los *Channel Status Reports* (CSR). A partir de esta estimación es posible determinar un esquema de modulación y codificación para garantizar una determinada *Bit Error Rate* (BER) que dependerá del servicio ofrecido y de los esquemas de codificación disponibles. El procedimiento se muestra en la siguiente imagen [8]:

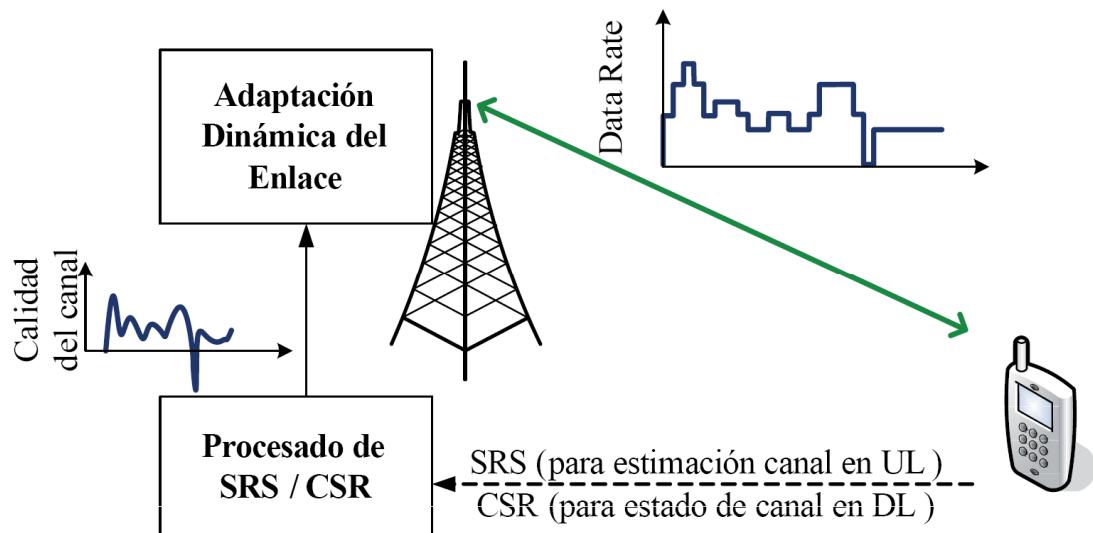


Figura 36. Adaptación dinámica

En LTE las transmisiones se organizan en *transport blocks* (TB). La adaptación dinámica del enlace se realiza mediante la selección del *Transport Format* (TF). El TF especifica cómo se van a realizar las transmisiones a través de la interfaz radio para un determinado *radio bearer*. En concreto se especifica el tamaño del TB, el esquema de modulación y el *mapping* en las antenas en el caso de transmisión MIMO. Los esquemas de modulación utilizados en DL son QPSK, 16 QAM y 64 QAM, mientras que para el UL se contempla PSK y 16 QAM y opcionalmente 64 QAM dependiendo de las capacidades del terminal

2.5.2.5 ESTRATEGIAS DE SCHEDULING

El estándar define los mecanismos para hacer posible el *scheduling* de paquetes, pero no define las estrategias específicas para decidir qué usuarios transmiten y en qué PRBs en una determinada subtrama [8]. Estas estrategias serán pues, de implementación propia por parte del fabricante. A continuación se describen algunas estrategias típicas

- *Maximum Rate* (MR) [9]: Esta estrategia selecciona al usuario que experimenta, en cada subtrama, las mejores condiciones del canal radio en un PRB dado. Sin embargo, MR no es justo en algunos escenarios, donde un usuario que experimentase una calidad del canal muy superior al resto (por estar muy cerca de la estación base) obtendría casi siempre el canal, impidiendo las transmisiones del resto de usuarios, lo que es inaceptable desde el punto de vista de la calidad del servicio.
- *Round Robin* (RR): Esta estrategia asigna cíclicamente el canal a los usuarios sin considerar las condiciones del canal radio (es decir no es *channel aware*). Por lo tanto, es una estrategia justa en el sentido de que cada usuario tiene asignado el canal durante el mismo tiempo. Sin embargo, al no considerar las condiciones del canal, no está adaptado a las necesidades de los usuarios, donde, presumiblemente, aquellos con peor condición del canal radio requerirán más tiempo el canal para igualar su calidad de servicio a la de los usuarios con las mejores condiciones radio.
- *Proportional Fair* (PF): Esta estrategia trata de combinar un uso del canal radio cercano a la máxima capacidad con un reparto justo de los recursos entre los usuarios. Para ello, se hace la selección del usuario a transmitir en base a la combinación de criterios tales como la tasa binaria media que ha obtenido el usuario m en un determinado periodo de tiempo...

2.5.2.6 SCHEDULING SEMI-PERSISTENTE

Los mecanismos de *scheduling* que se han descrito hasta el momento permiten que el eNB pueda hacer una planificación de las transmisiones totalmente dinámica y flexible, adaptada a las condiciones cambiantes del canal y el tráfico en la celda [8]. No obstante, esto requiere de una señalización explícita de las asignaciones de *scheduling* que consumen recursos del PDCCH. En el caso de transmisiones de grandes volúmenes de datos, esta señalización puede ser asumible, pero para servicios con pequeños volúmenes de tráfico que llegan de forma regular (por ejemplo VoIP) el *scheduling* dinámico puede ser ineficiente desde el punto de vista de la sobrecarga de señalización. Para ello, el estándar introduce el mecanismo de “*scheduling* semi-persistente”.

El *scheduling* semi-persistente permite indicar a un terminal que una asignación de *scheduling* (*downlink scheduling assignment* o *uplink grant*) es válida en lo sucesivo en periodos de, en general, T subtramas, no siendo necesario enviar explícitamente asignaciones de *scheduling* a través del PDCCH a partir de ese momento. Esto es válido mientras no se indique lo contrario por parte del eNB. La decisión de la periodicidad T y la activación o desactivación del *scheduling* semi-persistente reside en las capas RRC.

Adicionalmente, el terminal puede seguir recibiendo asignaciones de *scheduling* dinámicas en cualquier subtrama (en caso de coincidir con una subtrama de *scheduling* semipersistente, la asignación dinámica tiene preferencia). De este modo, sigue siendo posible variar de forma dinámica los recursos asignados a un terminal.

2.5.3 CONTROL DE POTENCIA

Como ya se ha mencionado, el control de potencia es el conjunto de herramientas por las que se controla la potencia de transmisión de los canales físicos para asegurar que se reciben correctamente en cualquier punto de la celda a la vez que permite alargar la vida de la batería de los terminales [8].

En el caso del DL, el control de potencia estaría totalmente controlado por el eNB, ya que conoce la potencia disponible en todo momento para la transmisión. No obstante, lo más común es que no se implemente control de potencia, ya que, debido a que el consumo de potencia no es crítico para el eNB, no es un problema distribuir toda la potencia disponible en el eNB uniformemente entre los PRBs. Existen algunas propuestas para asignación óptima de potencia denominadas *water-filling* que consisten en asignar dinámicamente más potencia a aquellas subportadoras OFDM que tienen las mejores condiciones de desvanecimiento e interferencias pero su ganancia es marginal.

A diferencia del DL, en el UL no es recomendable hacer que los terminales transmitan con máxima potencia, ya que esto reduciría drásticamente la duración de la batería e incrementaría la interferencia intercelular. Por ello, el control de potencia en el UL se hace indispensable.

El control de potencia en el UL en LTE es centralizado y está controlado por el eNB. Como veremos, éste necesita enviar comandos de ajuste de potencia de transmisión al terminal, lo que exige que el mecanismo de control de potencia para el UL tenga que estar estandarizado en LTE. Básicamente, el control de potencia en UL es una combinación de un mecanismo de control en lazo abierto y en lazo cerrado. En lazo abierto (*open-loop*), la potencia de transmisión del terminal se ajusta en función de una estimación de las pérdidas de propagación (*pathloss*) en DL, de forma que se compensen dichas pérdidas para la transmisión en UL. En lazo cerrado (*close-loop*) la red envía al terminal comandos específicos de control de potencia para ajustar y controlar la potencia de transmisión del terminal.

En LTE se estandarizan los mecanismos de control de potencia en el UL para los siguientes canales físicos y señales de referencia [8]:

- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH).
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH).
- *Sounding Reference Signals* (SRS)

2.5.4 INTER-CELL INTERFERENCE COORDINATION

Como se ha visto, la funcionalidad de *scheduling* de paquetes asegurará la ortogonalidad entre las transmisiones de usuarios en una misma celda (es decir, éstas no se interfieren mutuamente), pero no gestiona la interferencia entre transmisiones de usuarios conectados a distintas celdas. Esta interferencia intercelular podría llegar a ser especialmente notable en LTE, provocando una degradación sustancial de las prestaciones del sistema principalmente por los siguientes motivos [8]:

- Disminuye la SINR por PRB, con lo que se deben seleccionar esquemas de modulación y codificación de mayor protección y de baja eficiencia espectral, reduciéndose así la cantidad de bits que se pueden enviar por PRB.
- Aumenta la potencia de transmisión en UL para asegurar una recepción adecuada, con el consiguiente consumo de potencia en el terminal.
- Se necesita, en general, más retransmisiones HARQ para la entrega favorable de paquetes, incrementándose la carga de señalización.

La función *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC) [8] se encarga de mitigar la interferencia intercelular mediante la coordinación de los *schedulers* en celdas adyacentes. Es decir, ICIC permite que las decisiones de los *schedulers* en cada celda se hagan teniendo en cuenta las transmisiones planificadas en celdas contiguas, tanto evitando hacer transmisiones simultáneas en el mismo recurso radio, como controlando la potencia de transmisión. La funcionalidad ICIC reside en cada eNB pero, como se verá a continuación, para su correcto funcionamiento requiere de la interacción de varios eNBs, tratándose así de una funcionalidad de gestión de recursos radio multicelda. El objetivo ICIC es decidir un conjunto de restricciones y preferencias sobre el uso y la potencia de transmisión por PRB de un determinado eNB para mitigar la interferencia intercelular. Esta coordinación es posible gracias a la existencia de la interfaz X2 de señalización entre eNBs. A continuación se muestra el esquema funcional para la aplicación ICIC en LTE [8]:

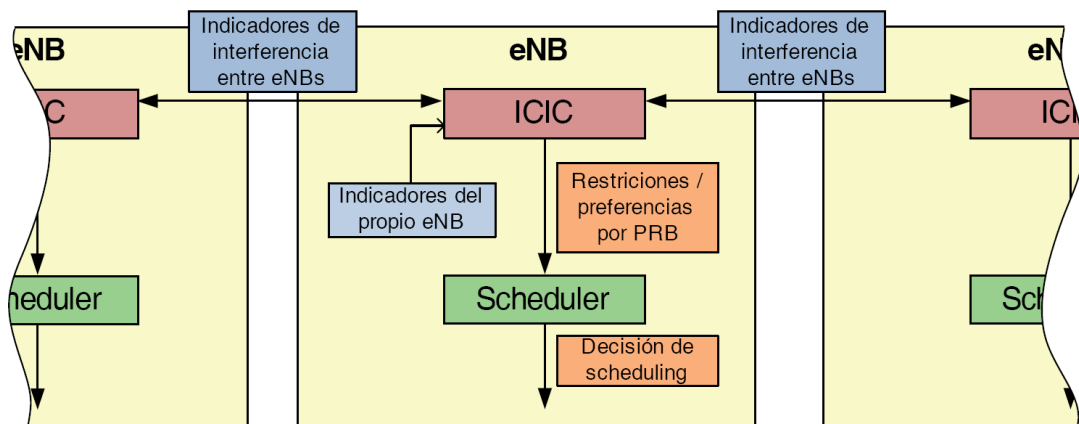


Figura 37. Esquema funcional para ICIC

Los métodos estandarizados ICIC se dividen en 2 categorías [8]:

- Indicadores reactivos.- Son métodos basados en las últimas mediciones. Dichas mediciones se utilizan para monitorear el funcionamiento, y si la interferencia detectada es demasiado alta, entonces se toman medidas adecuadas para reducirla a unos niveles aceptables. Las acciones podrían incluir ajustes en la potencia de transmisión o acciones de *scheduling* de paquetes para reducir la interferencia producida entre las células.
- Indicadores proactivos.- Aquí un eNodeB informa a sus eNodeBs vecinos acerca de sus intenciones sobre el *scheduling* para sus usuarios (es decir, enviando anuncios), por lo que el eNodeB vecino puede tomar en cuenta esta información. Los indicadores proactivos se apoyan en señalización estandarizada entre eNodeBs a través de la interfaz X2.

2.5.4.1 INDICADORES DE INTERFERENCIA Y ESTRATEGIAS ICIC EN DOWNLINK

Los indicadores ICIC proactivos en el *downlink* se estandarizan mediante el indicador *Relative Narrowband Transmit Power* (RNTP) [8]. El RNTP indica por anticipado la máxima potencia de transmisión en el *downlink* por PRB. Por lo tanto, a partir de esta información, los eNodeBs vecinos sabrán en que PRB dicha célula planea utilizar la máxima potencia, y la idea es emplear diferentes patrones de potencia en las células para mejorar las condiciones generales de SINR de los UEs.

Es importante ver que no se trataría de un reuso estático como se hacía en GSM, si no que cada eNB tiene potencialmente todo el espectro disponible en caso de necesitarlo, y que el reuso de frecuencias se obtiene mediante el establecimiento on-line de una serie de restricciones sobre el uso de PRBs.

En la figura siguiente se muestran diferentes esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC [8]:

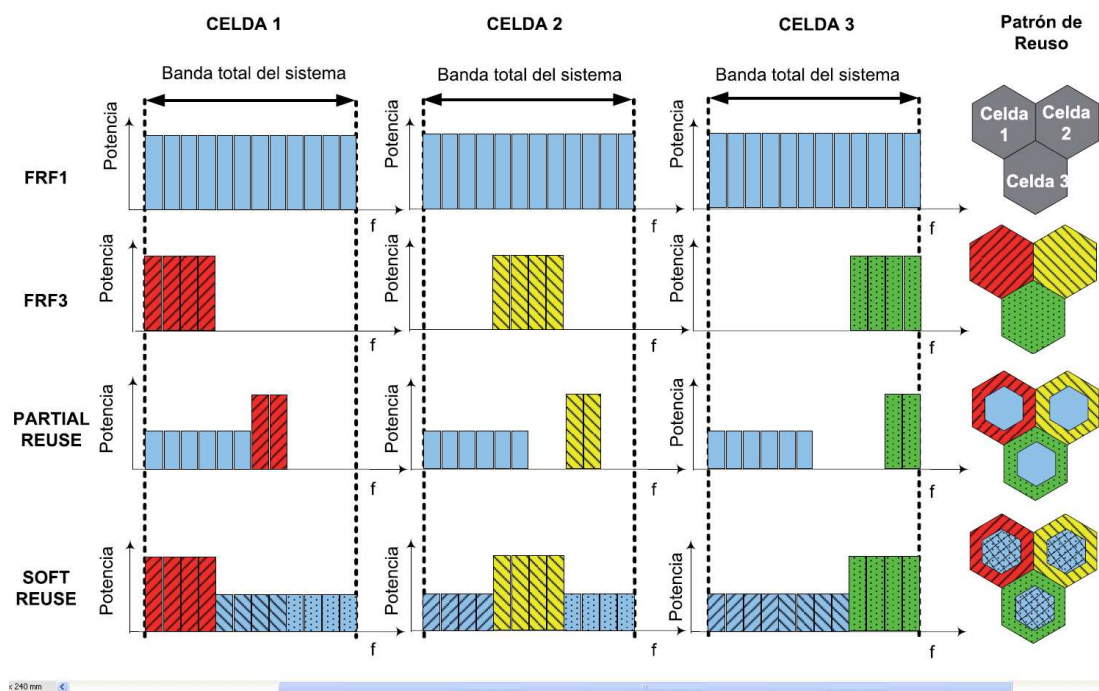


Figura 38. Reuso de frecuencias LTE

Tenemos:

- Reuso 1 (FRF1).- Todos los PRB están disponibles en todas las celdas
- Reuso 3 (FRF3).- Los PRB se dividen en 3 grupos que se asignan a agrupaciones de 3 celdas. Este esquema es muy útil en situaciones donde interese reducir la interferencia intercelular, aunque se reduce drásticamente la capacidad potencial por celda, y en algunos casos se podría no garantizar la calidad de servicio de las conexiones establecidas en términos de velocidad de pico y *throughput* obtenido por los usuarios
- Como solución intermedia, se proponen un par de estrategias denominadas *Partial Reuse (PR)* y *Soft-frequency Reuse (SR)*. Tal y como se observa en la figura, estas estrategias combinan los esquemas FRF1 y FRF3 en la misma celda, de forma que el esquema FRF1 se usa para los usuarios

cercanos al eNB y el FRF3 se deja para los usuarios en el borde de la celda. Nótese además que en SR todos los PRB están disponibles en cada celda.

2.5.4.2 INDICADORES DE INTERFERENCIA Y ESTRATEGIAS ICIC EN UPLINK

En el caso del UL, se ha estandarizado un indicador proactivo y otro reactivo. El indicador proactivo se denomina *High Interference Indicator* (HII) [8]. Este indicador consiste en un mensaje con un bit por PRB que la celda servidora envía a los eNBs vecinos, indicando (cuando el bit está a 1) la intención de usar esos PRBs para planificar las transmisiones de los usuarios en el borde de la celda (es decir, de aquellos que generan más interferencia en UL). Por otro lado, el indicador reactivo se denomina *Overload Indicator* (OI), y es un mensaje que indica para cada PRB si la interferencia más ruido medida por el eNB es alta, media, o baja.

Por su parte, las estrategias ICIC usan esta información para determinar la forma más propicia de planificar las transmisiones de sus usuarios, de forma que se eviten PRBs con una alta interferencia reportados en el HII, y se reduzca la interferencia causada a la celda que inicialmente envió el mensaje OI. La interacción entre HII y OI, y cómo una celda usa esta información para realizar las acciones concretas de ICIC no está estandarizada y posiblemente será dependiente de cada fabricante.

2.5.5 RECEPCIÓN DISCONTINUA (DRX)

El tráfico de paquetes de datos suele ser a ráfagas, con períodos de actividad de transmisión seguidos por largos períodos de silencio. Es evidente que es beneficioso monitorizar la señalización de control en cada subtrama para recibir "*uplink grants*" o transmisiones de datos en el *downlink* para poder reaccionar ante modificaciones en el comportamiento del tráfico. Al mismo tiempo, esto tiene un costo en términos de consumo de potencia por el terminal, ya que el circuito receptor de un terminal típico representa una cantidad para nada despreciable de consumo de potencia. Para reducir el consumo de potencia en el terminal, LTE incluye mecanismos para la recepción discontinua (DRX) [13].

El mecanismo básico para el DRX es un ciclo de DRX configurable en el terminal. Con un ciclo DRX configurado, el terminal monitoriza la señalización de control del *downlink* sólo en una subtrama por ciclo DRX, estando apagado el circuito receptor para el resto de subtramas. Esto permite una reducción significativa en el consumo de energía: cuanto mayor es el ciclo, menor es el consumo de energía. Naturalmente, esto implica restricciones para el *scheduler* ya que el terminal sólo es accesible en las subtramas activas.

En muchas situaciones, si el terminal tiene activa una transmisión o recepción de datos en una subtrama, es muy probable que vuelva a estar activo en un futuro próximo. Una razón podría ser que no es posible transmitir todos los datos del búfer de transmisión en una única subtrama, por lo que subtramas adicionales serán necesarias. Se podría esperar hasta la nueva subtrama activa de acuerdo al ciclo DRX, pero posiblemente daría lugar a retrasos adicionales. Por tanto, para evitar retrasos, el terminal se queda en el estado activo durante un tiempo configurable. Esto se lleva a cabo por el terminal, reiniciando un

temporizador de inactividad cada vez que se encuentra activo y permaneciendo despierto hasta que se agote el tiempo

Las retransmisiones se llevarán a cabo independientemente del ciclo de DRX. De este modo, el terminal recibe y transmite reconocimientos H-ARQ de manera normal en respuesta a la transmisión de datos.

El mecanismo anterior, un ciclo (largo) DRX en combinación con que el terminal permanezca despierto durante algún tiempo después de haber estado activo, es suficiente para la mayoría de los escenarios. Sin embargo, algunos servicios, como voz sobre IP, se caracterizan por períodos de transmisión regular, seguidos de periodos de escasa o nula actividad. Para dar soporte estos servicios, se puede emplear de manera opcional un segundo ciclo (corto) DRX además del ciclo largo anteriormente descrito. Normalmente, el terminal obedece al ciclo largo DRX, pero si recientemente ha estado activo, se sigue un ciclo corto DRX durante algún tiempo [13].

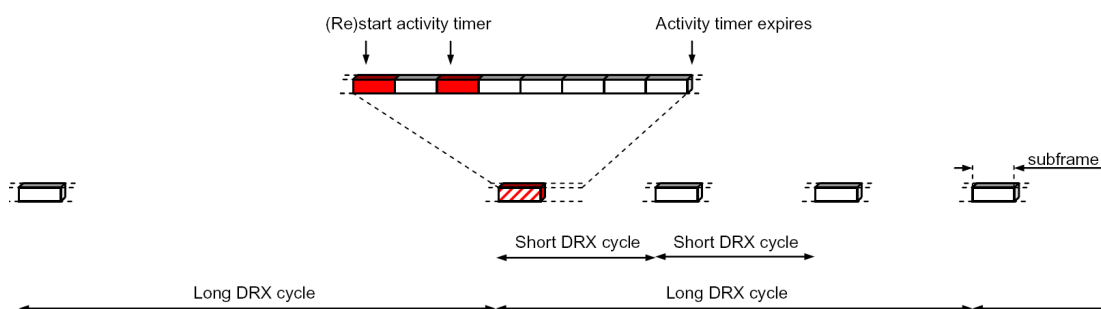


Figura 39. Ciclo DRX

2.6. OFDM Y OFDMA

2.6.1 INTRODUCCIÓN

Recientemente las modulaciones multiportadora, MCM (*Multicarrier Modulation*) están obteniendo mayor interés y están siendo usadas para una gran cantidad de aplicaciones debido a las múltiples ventajas que tiene frente a la modulación por portadora única. Una ventaja obvia es que transmitiendo simultáneamente N símbolos en N portadoras reduce la tasa de símbolo a un N -ésima parte de la tasa de símbolo de los datos dispuestos en serie, o bien, incrementa la duración del símbolo N veces. De este modo, el efecto de la Interferencia Intersimbólica, ISI (*Inter Symbol Interference*), debida a la dispersión temporal del canal se reduce y la ecualización en el receptor se vuelve sencilla, o incluso innecesaria.

Las portadoras múltiples en MCM se denominan subportadoras. La banda frecuencial ocupada por la señal contenida en una subportadora se denomina sub-banda. Para separar las señales de las sub-bandas en el receptor el método más sencillo es el denominado Acceso múltiple por División de Frecuencias, FDM (*Frequency Division Multiplexing*) y consiste en espaciar el centro frecuencial de las subportadoras de manera que queden bien separadas, haciendo que el espectro de las N sub-bandas virtualmente no estén solapadas. Éste proceso requiere que en recepción se utilicen N filtros paso banda muy selectivos para separar dichas sub-bandas, hecho que complica y encarece el sistema.

Otro método para separar las señales de las sub-bandas es permitir el solapamiento de las sub-bandas adyacentes haciendo que la obtención de cada sub-banda en recepción se consiga mediante un espaciado de los centros frecuenciales sea de $1/T$ entre dos subportadoras, siendo T el periodo de símbolo. Mediante este espaciado se consigue que todas las subportadoras sean ortogonales entre ellas y que puedan ser separadas en recepción mediante bloques de correlación y no mediante el uso de filtros selectivos. Este método, es denominado OFDM.

OFDM es similar a FDM, sin embargo, la idea es acercar los espectros tanto como sea posible sin que exista interferencia entre ellos. De esta forma se usa el espectro en forma más eficiente. Esto implica que las frecuencias de las diferentes portadoras deben escogerse adecuadamente. Comparando el método OFDM con el método FDM, el primero utiliza menos ancho de banda y no requiere el uso de filtros paso banda para cada sub-banda.

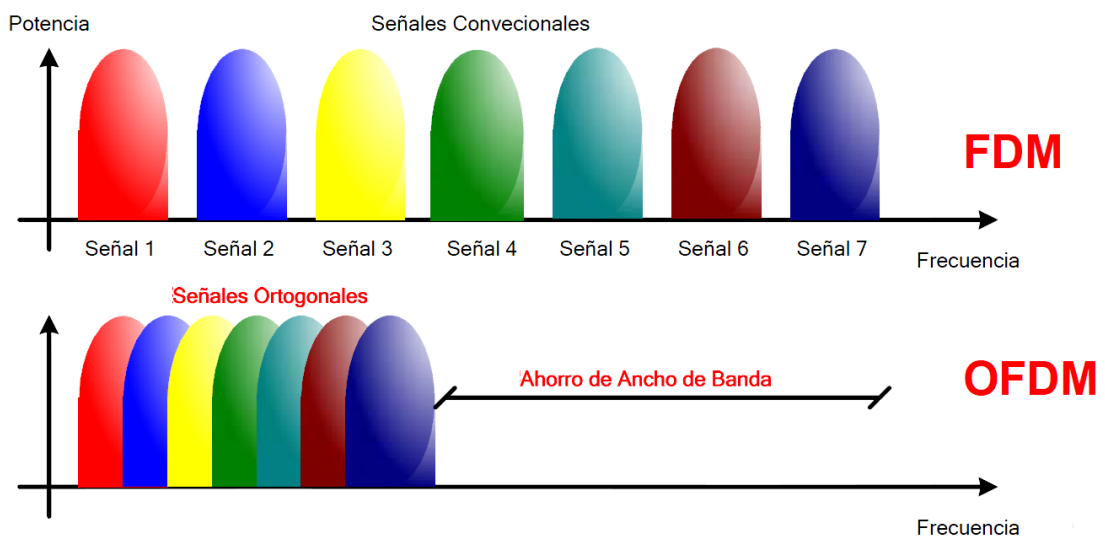


Figura 40. Comparación OFDM y FDM

OFDM se presentó durante los años 60 pero hasta los años 70 y 80 no fue utilizado. A pesar de sus numerosas ventajas, su complejidad de implementación ha perjudicado a sus aplicaciones. No obstante, recientemente este método de modulación está ganando popularidad gracias a los grandes avances en la velocidad y la potencia de procesamiento de los dispositivos de procesamiento digital de la señal.

OFDM se utiliza en servicios de ADSL y en redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) así como en aplicaciones de radiodifusión, televisión digital (incluyendo de alta definición), comunicaciones ópticas y comunicaciones móviles.

2.6.2 PROBLEMAS ASOCIADOS A LA PROPAGACIÓN MULTITRAYECTO

Una de las características fundamentales de las comunicaciones radio en enlaces terrestres es el de la propagación multitrayecto. Este tipo de propagación consiste en que entre el transmisor y receptor existe más de un camino de propagación, ya que la señal radio que se propaga no es un rayo estrecho que va directamente de la antena transmisora a la receptora, sino un frente de onda

amplio que se va difractando y reflejando a medida que encuentra obstáculos en su camino, como edificios altos o irregularidades del terreno.

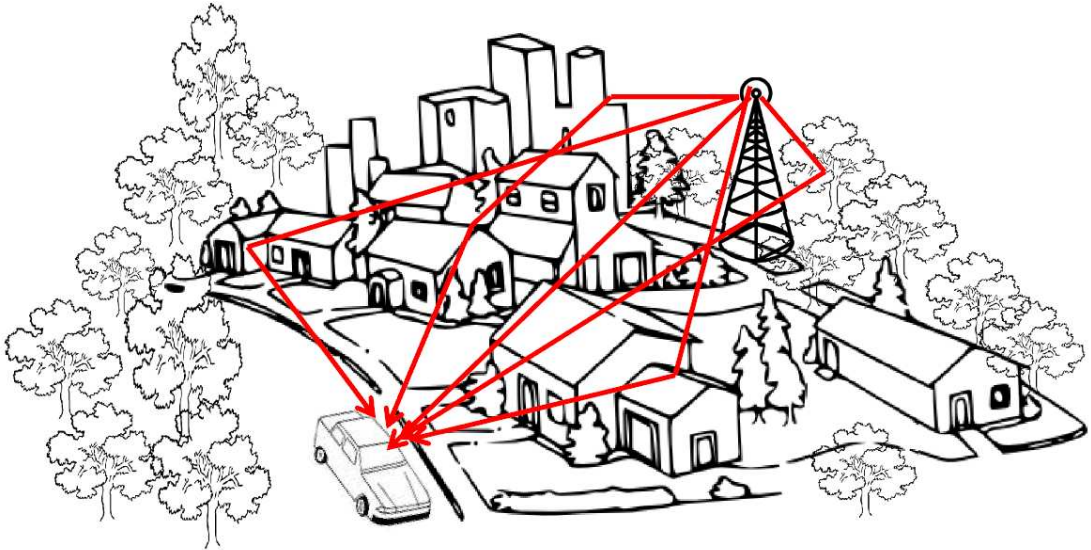


Figura 41. Propagación multitrayecto

El estudio y modelado del fenómeno de la propagación multitrayecto se puede resumir diciendo que al receptor llegan varias réplicas de la misma señal, con diferentes retardos entre ellas. Las primeras, tres o cuatro (dependiendo del entorno), pueden contener valores significativos de energía, mientras que las restantes suelen llegar muy atenuadas y se pueden despreciar. Se plantean dos escenarios posibles en función del valor máximo del retardo diferencial entre las réplicas significativas (requiriendo cada escenario un receptor diferente), los cuales tienen lugar cuando:

1. El retardo diferencial máximo no supera en dos o tres veces el periodo de símbolo de modulación, que es el caso que se plantea en GSM. Con una velocidad de modulación de 270,83 kbit/s y un periodo de símbolo de 3,7 μ s, el retardo entre los diferentes trayectos no suele ser superior a 10 μ s. Por cada símbolo transmitido, la señal temporal que se obtiene a la salida del demodulador del receptor es un pulso muy distorsionado, que interfiere de forma significativa a los pulsos adyacentes. Para devolver el pulso a su forma original en el receptor se requiere un ecualizador, tanto más complejo cuanto mayor sea el cociente entre el retardo diferencial máximo y la anchura de símbolo. En GSM el ecualizador es un filtro FIR de siete coeficientes que se suele implementar mediante un algoritmo de Viterbi.

2. El retardo diferencial es mucho mayor que el periodo de símbolo. En este caso, a la salida del demodulador lo que se obtiene no es un pulso, sino varios pulsos independientes, cada uno de ellos correspondiente a una réplica. Se puede considerar que la señal transmitida se ha "roto" en varias réplicas iguales, las cuales se encuentran bien separadas entre ellas. Este es el caso que se plantea en UMTS, donde el periodo de chip es 0,26 μ s, y los retardos diferenciales son de varios microsegundos. Para reconstruir la señal lo que se emplea es un receptor conocido como de tipo Rake, que alinea en el tiempo las diferentes réplicas y las suma en fase. A medida que se aumenta el ancho de banda de transmisión el periodo de símbolo disminuye, y llega un momento en que la complejidad del receptor Rake se vuelve excesiva, siendo más ventajoso desde un punto de vista de implementación utilizar otro sistema de modulación (OFDM)

Supóngase un sistema radioeléctrico en que se tiene una portadora modulada digitalmente por símbolos consecutivos, cada uno de longitud N bits y duración T_S y que la señal llega al receptor por dos trayectos diferentes, de distinta longitud, de modo que una señal llega primero y la otra con un retraso equivalente a $4.5T_S$ como se ilustra en la figura (a). Este retraso da lugar a que en el receptor esté presente el símbolo n durante el período de integración, es decir de demodulación, simultáneamente con porciones de los símbolos cuarto y quinto previos, $n-4$ y $n-5$, que se comportarán como señales interferentes sobre el símbolo deseado [14].

Si el retraso introducido por el segundo trayecto es inferior a T_S , se dará una situación similar a la que se ilustra en figura (b). La porción del símbolo $n-1$ presente durante el período de integración actuará también como interferencia, en tanto que la porción retrasada del propio símbolo n se sumará consigo mismo de forma constructiva o destructiva, según sea la fase entre la porción directa y la retrasada.

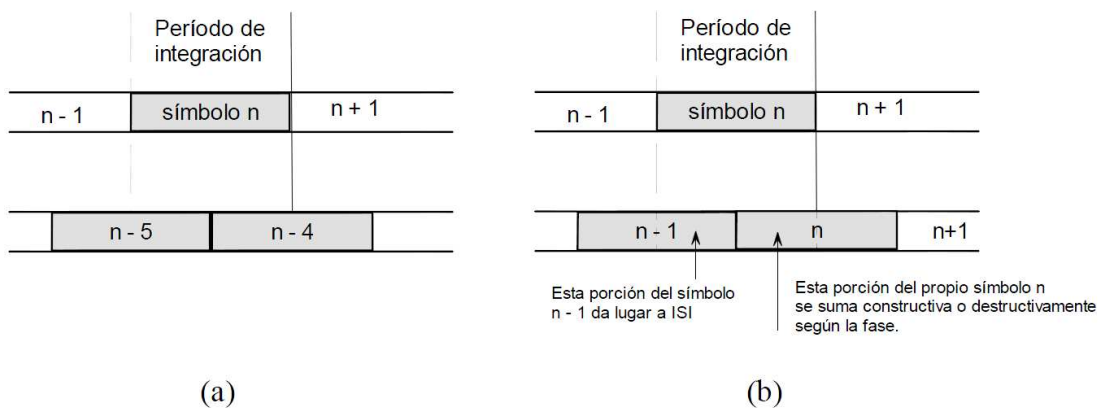


Figura 42. Señal por distintos caminos

Aun cuando el retardo sea menor a la duración de un símbolo, se mantiene, en mayor o menor escala, interferencia entre símbolos debido a la presencia del símbolo previo. Esto podría eliminarse si el período durante el que se produce cada símbolo se hace mayor que el período durante el cual el receptor realiza la integración de la señal, lo que sugiere la conveniencia de utilizar un intervalo de guarda [14]. (El intervalo de guarda se refiere al dominio del tiempo y no debe confundirse con la banda de guarda en el dominio de frecuencia) como se verá más adelante.

Así pues, la multiplexación por división ortogonal en frecuencia, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), como hemos visto es un sistema de modulación que consiste en enviar la información no sobre una única portadora, sino sobre un múltiplex de muchas portadoras "adecuadamente espaciadas" en frecuencia, repartiendo la información entre todas ellas, de forma que aunque la velocidad de modulación del conjunto sea muy elevada, la de cada portadora individual es pequeña, lo que simplifica el problema de propagación multitrayecto.

Lo que diferencia al OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia es la ortogonalidad, pues el "espaciamiento adecuado" entre portadoras es un espaciamiento óptimo. Este espaciamiento consiste en que la separación espectral entre portadoras consecutivas es siempre la misma e igual al inverso del periodo de símbolo.

OFDM es una técnica de espectro esparcido ya que los datos se esparcen a través de un gran número de subportadoras. El impacto del multitrayectoria se mitiga debido a que a cada subportadora tiene un ancho de banda relativamente angosto y con una duración muy larga en el tiempo. Entonces, dado que tiene muchos flujos de bits relativamente lentos, el impacto del multitrayecto se puede reducir respecto a un solo flujo de bits de alta velocidad. La fuerza de la señal así como su interferencia y, por ende la relación señal-ruido puede diferir para cada canal, y esto se puede compensar al tener diferentes tasas de bits en cada subcanal así como ajustando el nivel de potencia para cada uno de estos subcanales.

2.6.3 CONDICIÓN DE ORTOGONALIDAD

Como se ha dicho, la clave de OFDM está en la ortogonalidad de las señales, esto permite mezclar varias de ellas en transmisión para luego separarlas en recepción sin que exista interferencia.

Por definición dos señales $g_1(t)$ y $g_2(t)$ son ortogonales, si su producto escalar, en el intervalo t_1-t_2 , es nulo [12].

$$\int_{t_1}^{t_2} g_1(t)g_2(t)dt = 0$$

Existen muchas familias de funciones que son ortogonales. Para aplicaciones prácticas es necesario utilizar aquellas que puedan generarse fácilmente. En general las funciones sinusoidales cuyas frecuencias son un múltiplo entero de una fundamental son ortogonales, para m y n enteros:

$$\int_0^T A_n \cos(n\omega_{fund}t) A_m \cos(m\omega_{fund}t + \varphi) dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ A_n A_m \frac{T}{2} \cos \varphi & m = n \end{cases}$$

$$\int_0^T A_n \cos(n\omega_{fund}t) A_m \sin(m\omega_{fund}t + \varphi) dt = 0 \text{ cualquier valor de } m \text{ y } n$$

Para cualquier valor de φ , siempre que $\Delta = \pm KT$, $K=0,1,2,3,\dots$

Donde T es el periodo de la fundamental, en este caso $\omega_{fund} = \omega$ y $T=2\pi/\omega$

Si se ubican varias señales ortogonales en el canal inalámbrico, en el receptor las podemos separar calculando la integral, en un periodo, entre la señal compuesta que llega al receptor y una senoide con frecuencia igual a la que queremos detectar. La diferencia de fase no es importante ya que la ortogonalidad no se ve afectada por la fase.

Si se supone que por un canal ideal se envía una señal compuesta por varias señales sinusoidales ortogonales, donde A_i contiene la información a transmitir [12]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t)$$

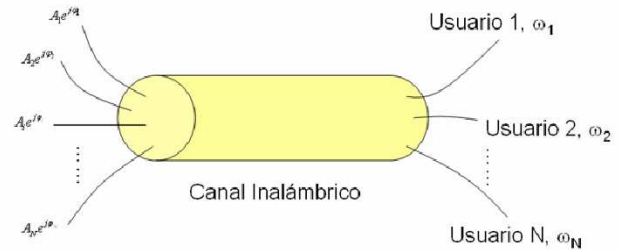


Figura 43. Canal inalámbrico

Para recuperar la subportadora de frecuencia ω_k basta con realizar la siguiente operación:

$$\int_0^T \cos(\omega_k t) s(t) dt = \int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt$$

Debido a que las señales son ortogonales entonces:

$$\int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt = A_k \int_0^T \cos(\omega_k t) \cos(\omega_k t) dt = \frac{A_k T}{2}$$

En OFDM al llegar el flujo de bits de alta velocidad, debe agruparlos en N grupos de $\log_2(M)$ bits cada uno, donde M es la cantidad de puntos en la constelación. De acuerdo con el patrón de unos y ceros de cada grupo se asigna una amplitud y una fase y una frecuencia a cada subportadora. Todos los N grupos, cada uno en una de las N subportadoras, se envían de manera simultánea. Un bloque de N símbolos que serían transmitidos de manera secuencial en T_s segundos cada uno se convierten en un bloque de N símbolos que se transmiten en paralelo en $T = N \times T_s$ segundos todos ellos. Los símbolos tienen entonces una duración N veces mayor permitiendo así reducir la interferencia intersimbólica, puesto que al durar más tiempo el porcentaje del símbolo afectado por otro símbolo adyacente es menor. Cada una de las subportadoras debe estar separada $1/T$ [Hz], condición que garantiza la ortogonalidad de las mismas

En ese sentido podríamos decir que el flujo de bits es multiplicado por una serie infinita de funciones ventanas rectangulares, cada una de duración T_s y desplazadas en tiempo. Si consideramos que el proceso se inició en $t=0$, entonces los pulsos están centrados en $iT_s/2$ donde $i=1, 3, 5$

Un pulso digital tiene el siguiente espectro:

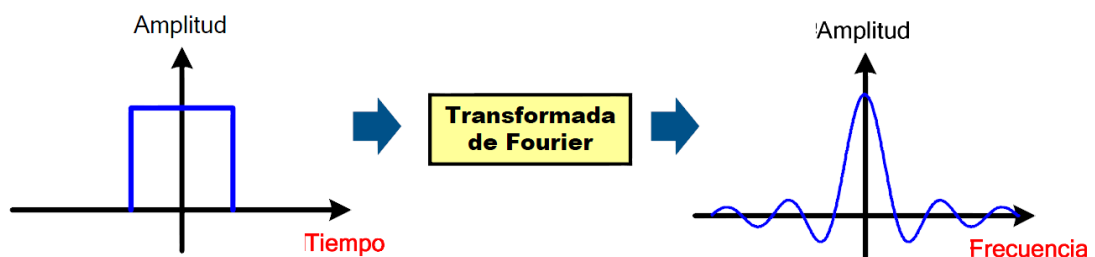


Figura 44. Transformada de Fourier de un pulso

Al modular una señal sinusoidal con un pulso digital el espectro anterior se desplaza.

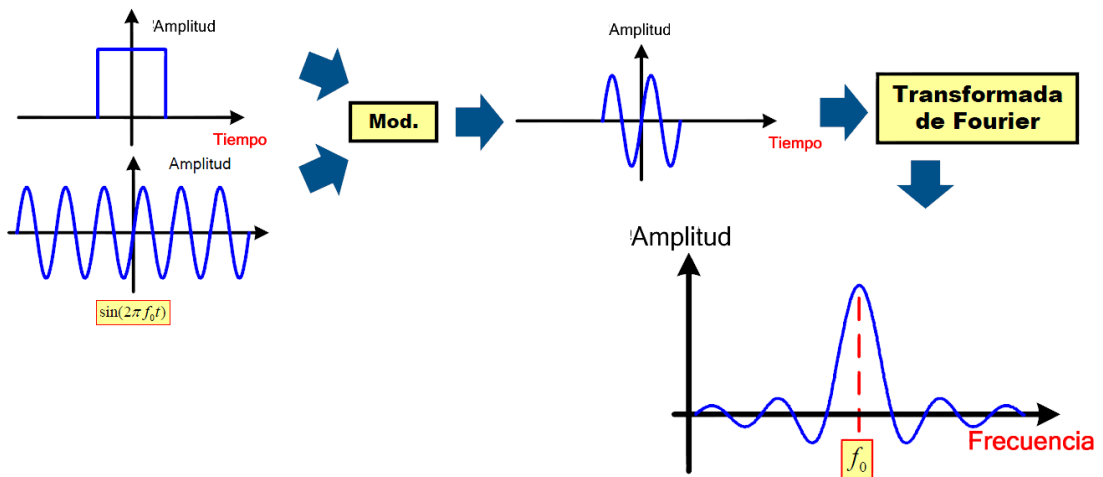


Figura 45. Modulación señal sinusoidal con un pulso digital

El desplazamiento depende de la frecuencia, f_0 , de la señal sinusoidal.

Si transmiéramos en paralelo varias señales moduladas utilizando FDM y OFDM el espectro total se vería así:

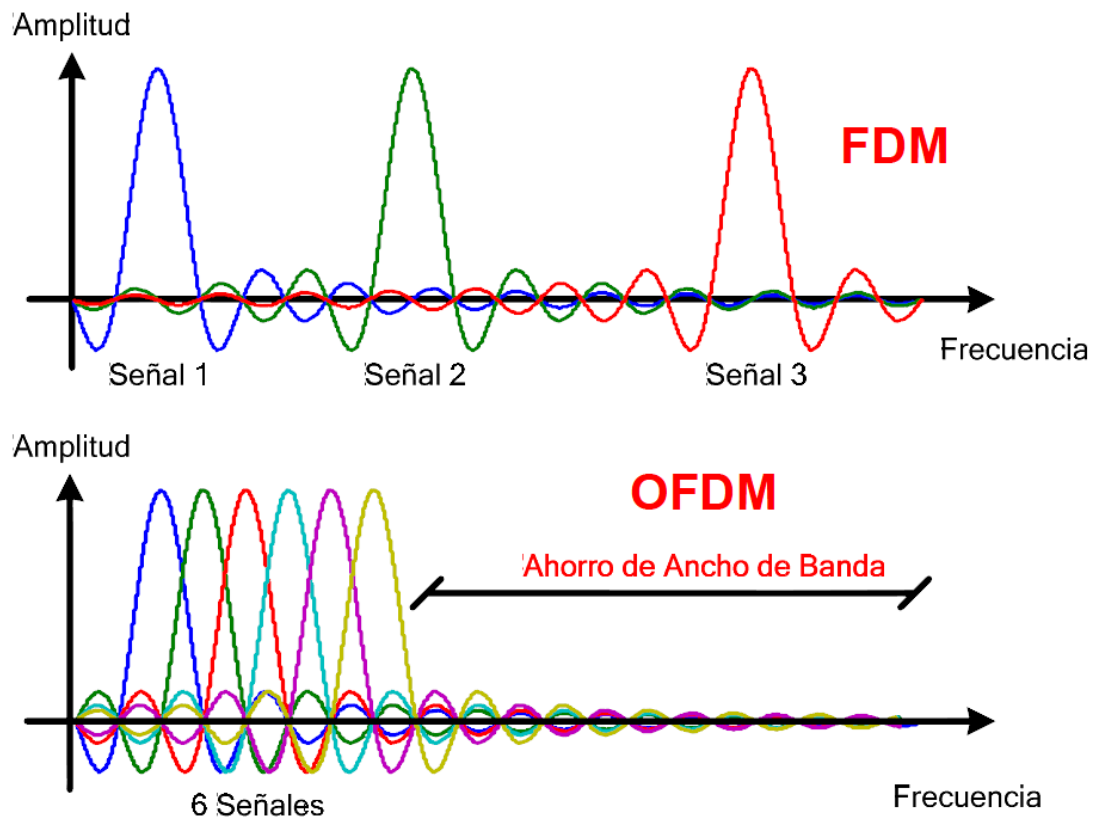


Figura 46. Transmisión simultánea de varias señales FDM y OFDM

En este ejemplo se aprecia que podemos transmitir una cantidad de información mayor en un ancho de banda mucho menor utilizando OFDM

En la figura adjunta se muestra una representación de varias portadoras ortogonales. Viendo una señal OFDM en el tiempo se aprecia que en el periodo de la portadora más baja caben varios periodos de las otras portadoras, alineadas todas en fase, mientras que en la representación espectral el máximo de cada portadora coincide con un nulo de las demás.

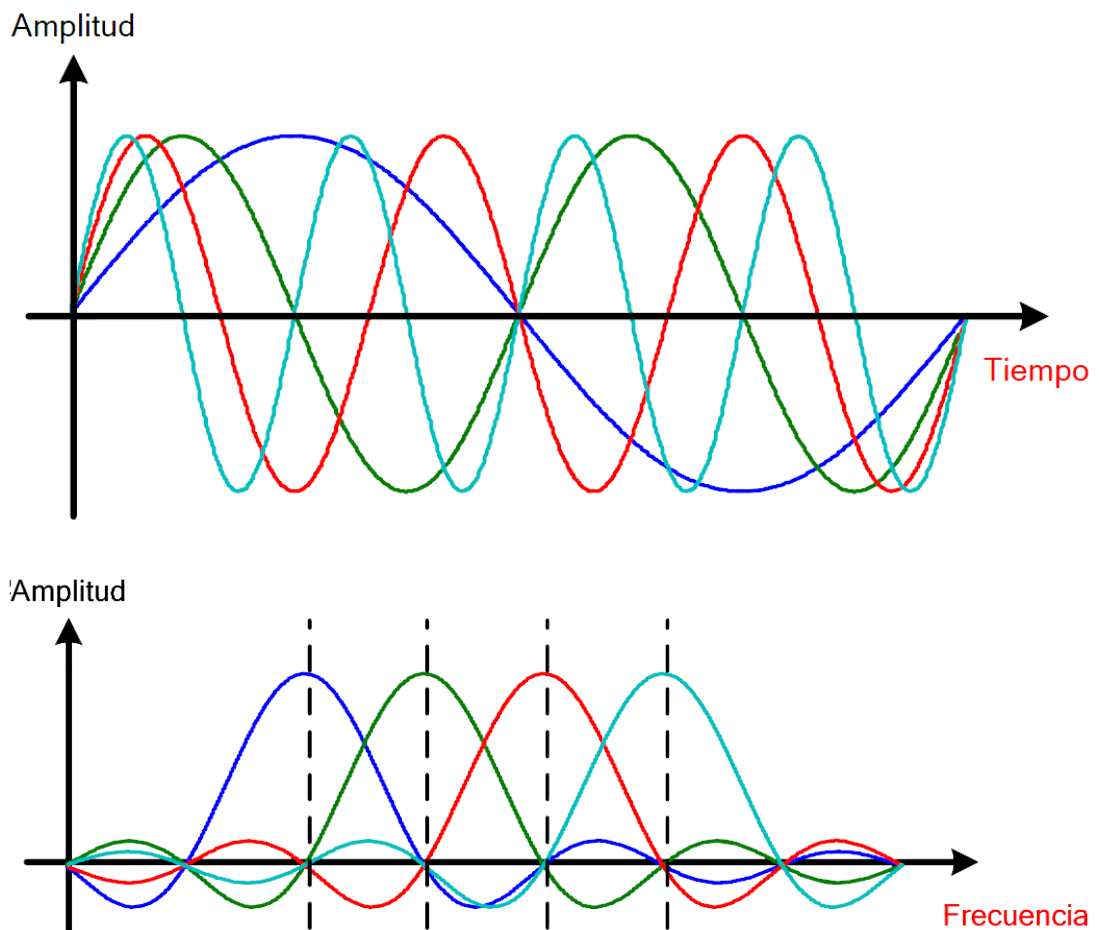


Figura 47. Varias portadores ortogonales

2.6.4 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER FFT/IFFT

Desde hace tiempo se han venido empleando diversos métodos FDM para el caso de canales selectivos en frecuencia tal y como ocurre con canales con multitrayectoria. Como se ha visto la separación y posterior discriminación entre subportadoras no supone tampoco un eficiente aprovechamiento del ancho de banda. Es entonces que se propone OFDM al emplear tonos ortogonales para modular las señales.

En la siguiente figura se observa un esquema de lo que inicialmente sería una implementación de OFDM con apenas 8 frecuencias ortogonales, realizada totalmente en la etapa de radiofrecuencia (RF) [15].

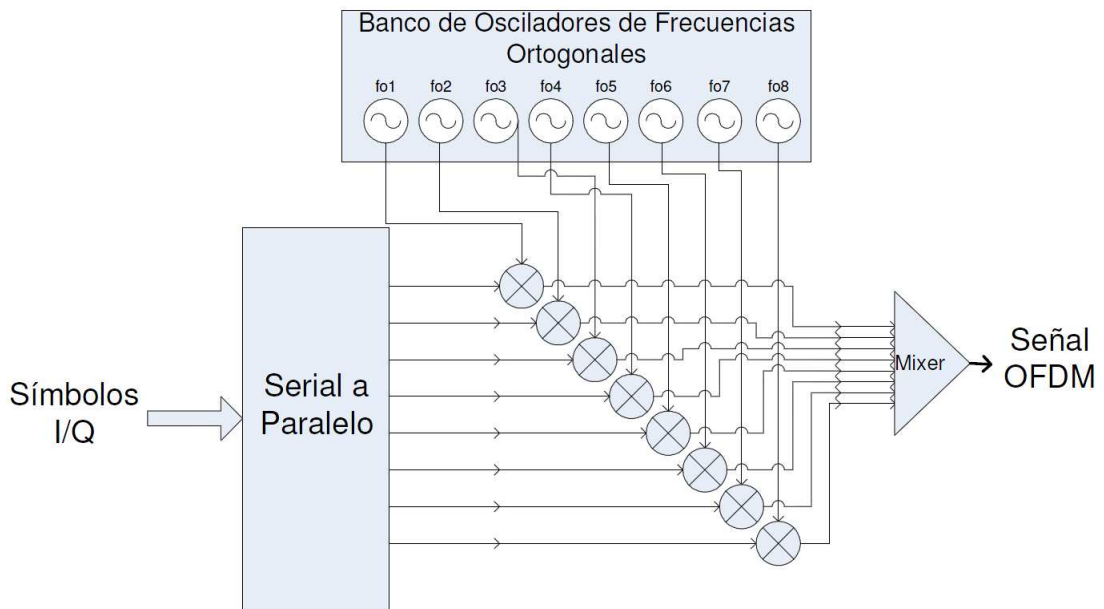


Figura 48. Esquema implementación OFDM

Se observa la dependencia del sistema de la precisión de cada oscilador y demás elementos que pueden introducir espúreos como mezcladores y divisores, y debemos contar con las no linealidades de filtros y amplificadores que suponen una demodulación coherente en el receptor. Si tomamos en cuenta que normalmente se requerirían muchas más subportadores, es fácil presumir la complejidad y costos prohibitivos en que incurriría este tipo de dispositivo. A pesar de estas limitantes este concepto fue introducido ya en los años 60's para usarse en radios militares de alta frecuencia.

Con posterioridad en el tiempo se presentaría la transformada discreta de Fourier (DFT) y su inversa (iDFT) como los métodos que le darían viabilidad a OFDM, en lugar de los bancos de osciladores y la inmensa y costosa circuitería de RF. El uso de estos algoritmos implica pasar el trabajo a una etapa de procesamiento digital de señales (DSP). Por eso la implementación pudo hacerse efectiva con los avances en dispositivos de muy larga escala de integración (VLSI) y el desarrollo de los algoritmos de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por tanto las etapas de la FFT/iFFT constituyen sin duda alguna el núcleo mismo del esquema de modulación OFDM, al ser el que reemplazaría los grandes bancos de osciladores e incluso de filtros [15].

Para comprender su utilización deberemos partir del concepto mismo de la Transformada de Fourier y su inversa, así conocidos, teniendo establecida cualquier señal continua $x(t)$ en el dominio del tiempo, la transformada de Fourier $\mathcal{F}\{x(t)\}$, constituye la relación con la misma señal en su representación en el dominio de la frecuencia, $X(\omega)$, tal como rezan las ecuaciones siguientes que define la Transformada de Fourier [15].

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = \mathcal{F}\{x(t)\}$$

Y la transformada inversa de Fourier

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega = \mathcal{F}^{-1}\{X(\omega)\}$$

Siempre recordando la relación entre la frecuencia en radianes con la frecuencia en hertzios

$$\omega = 2\pi f$$

Estas relaciones son ampliamente estudiadas en el mundo de las telecomunicaciones, y de manera más intensiva en las inalámbricas, donde el análisis en frecuencia tiene una inestimable importancia al ser el espectro un recurso limitado y controlado por los reguladores estatales. Sin embargo su utilización está limitada al campo de los conceptos, al no ser aprovechables de manera práctica cuando hay que usar métodos numéricos.

2.6.4.1 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

En un sistema digital, como lo sería nuestro esquema OFDM, el paso al mundo analógico se da mediante convertidores analógico a digital (DACs) y digital a analógico (ADCs) ubicados en la misma frontera del sistema que maneja la modulación en banda base. En vista de esto, las señales que manejamos en realidad están muestreadas, y son así mismo, señales discretas. Por tanto para realizar el análisis necesario en frecuencia, y luego entender los métodos numéricos que se deben usar comenzaremos por contemplar la utilización de la transformada de Fourier de una señal muestreada [15].

El muestreo implica una separación constante en el tiempo de los impulsos, y por lo tanto de las muestras; a esta separación se denomina "período de muestreo", T_s ; que es la inversa de la "frecuencia de muestreo", f_s . A veces también referidos como "período de resolución" y "frecuencia de resolución", en referencia a los DACs y ADCs, en los que implican el valor límite de resolución

$$T_s = \frac{1}{f_s}$$

De este modo, siendo la señal continua en el tiempo $x(t)$, siendo n el índice de las muestras de dicha señal, $x(nT_s)$ es para cada valor de n , una de las muestras de la señal $x(t)$.

Defínase un tren de impulsos $\sigma(t)$:

$$\sigma(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

Matemáticamente la señal muestreada la constituye la multiplicación del tren de impulsos $\sigma(t)$ por la señal $x(t)$. A la "versión muestreada de la señal continua en el tiempo" la podemos denotar con $x(n)$. Y su transformada de Fourier se definiría de la siguiente manera:

$$X(e^{j\omega}) = \mathcal{F} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \delta(t - nT_s) \right\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) e^{-j\omega T_s n}$$

Otra manera de escribir esta relación es la siguiente:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T_s} X(\omega - n\omega_s)$$

Ambas ecuaciones definen lo que se denomina "transformada de Fourier en tiempo discreto" o DTFT. De manera gráfica [16]:

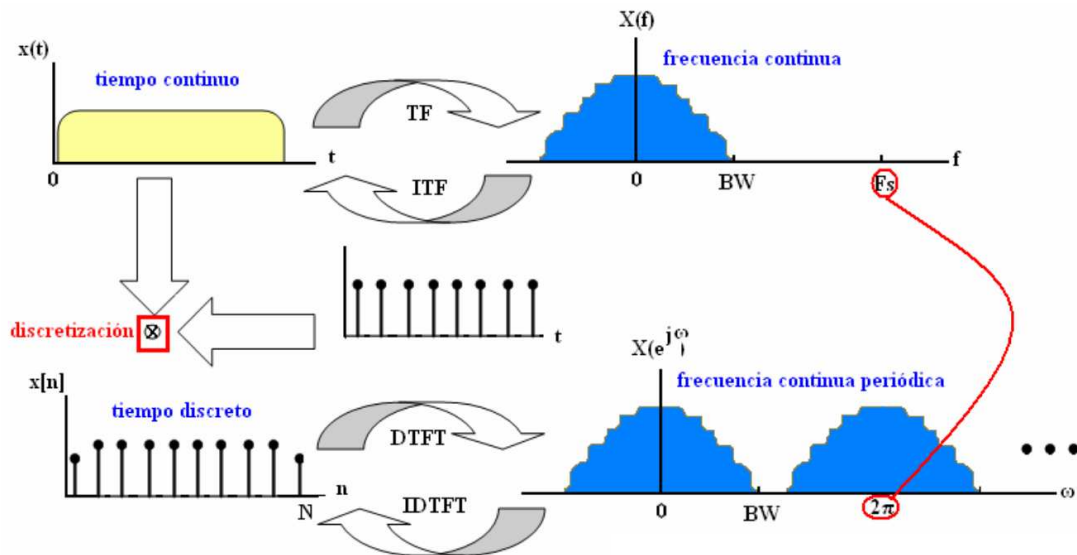


Figura 49. Transformada de Fourier

Al tratar de aterrizar estos conceptos con lo que se podría usar en la realidad, vemos que la utilización de la DTFT como método numérico o para DSP tiene dos limitantes básicas:

- Un sumatorio infinito no es computablemente posible
- Según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo limita el ancho de banda de las señales a la mitad de su valor

Por esta razón la versión computable de Fourier es la denominada Transformada Discreta de Fourier o DFT. Ésta es un algoritmo basado en la misma DTFT, pero donde se usa un número limitado de muestras en el tiempo, y como consecuencia obtendremos así mismo la misma cantidad de muestras en el dominio de la frecuencia

Se define la Transformada Discreta de Fourier (DFT) de una señal $x(n)$ como:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\frac{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}}$$

Al contrario que la transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT), esta transformación únicamente evalúa suficientes componentes frecuenciales para reconstruir el segmento finito que se analiza. Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los espúreos del espectro. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente [16].

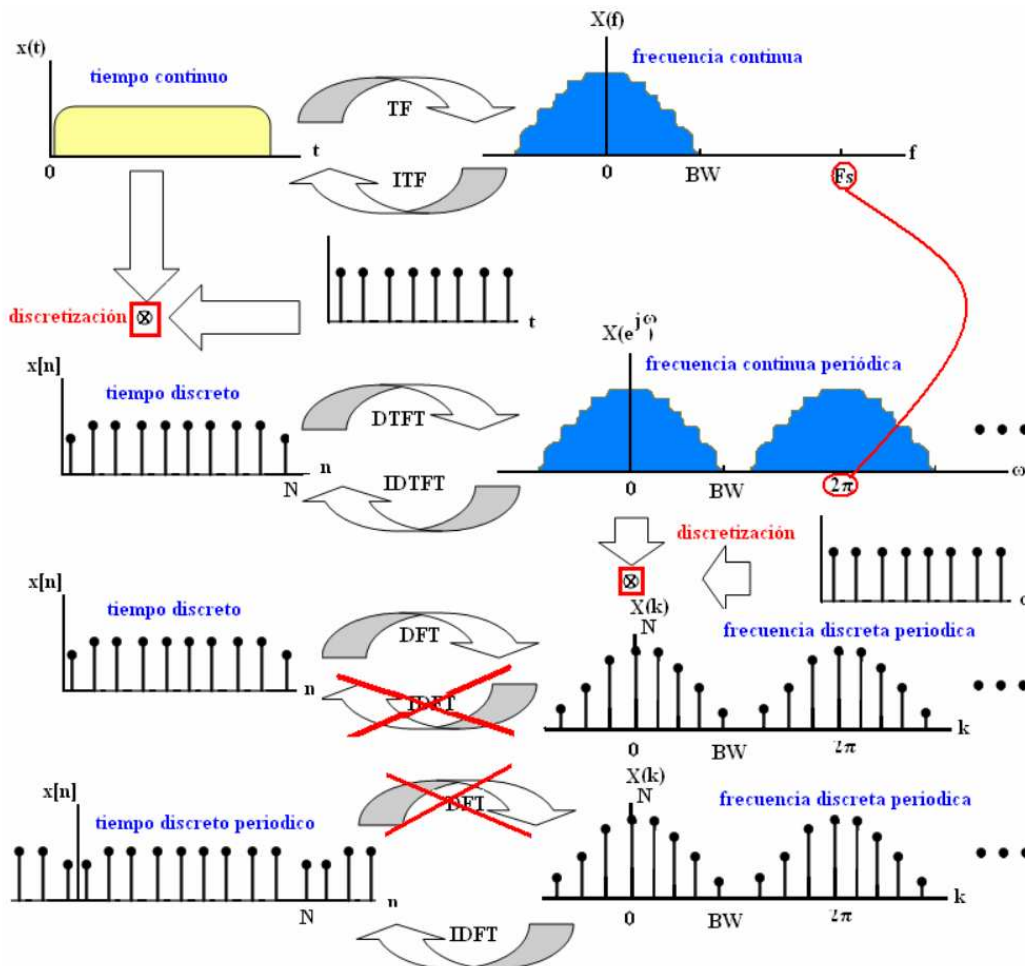


Figura 50. Transformada de Fourier tiempo discreto

La entrada de la DFT es una secuencia finita de números reales o complejos, de modo que es ideal para procesar información almacenada en soportes digitales

2.6.4.2 ALGORITMOS RÁPIDOS DE FOURIER

El cálculo de la DFT o su inversa, de acuerdo a las expresiones base descritas con anterioridad implica para su cálculo la realización de sucesivas multiplicaciones y sumas, además de los gastos de memoria que crecen de acuerdo al valor de muestras. Una primera aproximación al cálculo del DFT requeriría la suma compleja de N multiplicaciones complejas para cada una de las salidas. En total, N^2 multiplicaciones complejas y N^2 sumas complejas para realizar un DFT de N puntos [15].

Con el objeto básico de reducir dicho número de multiplicaciones, fue diseñada la denominada "Transformada Rápida de Fourier" o FFT, en el cual el número de multiplicaciones se reduce a $N(\log_2 N)/2$. La siguiente figura muestra la gran diferencia entre los dos algoritmos en cuanto al número de cálculos realizados, lo que justifica plenamente su uso, no obstante su complejidad.

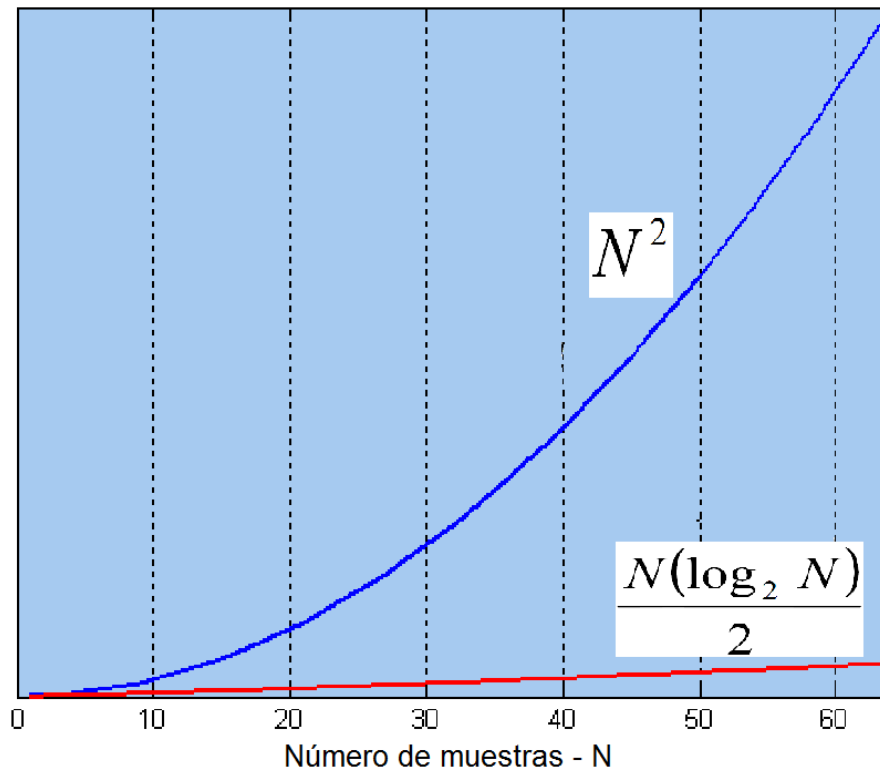


Figura 51. Transformada rápida de Fourier

El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo: la señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos (normalmente se permite la transformación de hasta 512, 1024, 2048 o 4096 muestras)

La FFT logra la eficiencia algorítmica a través de la estrategia "divide y vencerás". La idea básica es que un grupo de N muestras de la sumatoria de la DFT pueden ser expresadas como una combinación de sumatorias de DFT de N/2 muestras. Siendo así, cuando N es una potencia de dos, el proceso se puede repetir hasta llegar al caso de la simple sumatoria para DFT de solo 2 muestras. Podemos concluir que el proceso es además recursivo.

2.6.5 TIEMPO DE GUARDA Y PREFIJO CÍCLICO

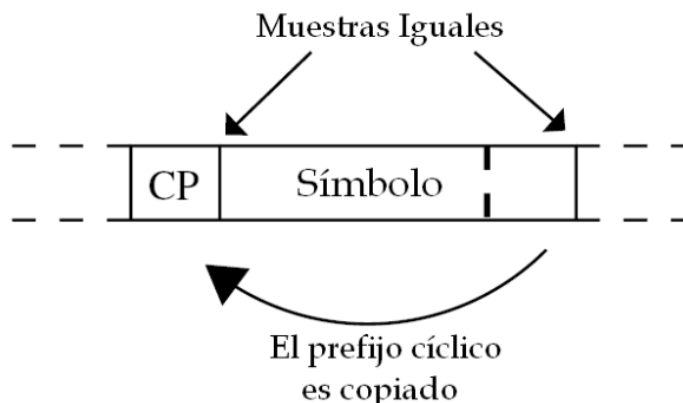


Figura 52. Prefijo cíclico

Como el símbolo recibido es compuesto de varias muestras, transmitidas de manera serial, podemos separar la interferencia entre símbolos (ISI) en dos partes. Unas perteneciente a un símbolo OFDM previamente transmitido y otras pertenecientes a versiones atrasadas del propio símbolo que es denominado

como ISI auto-interferente. La ISI introducida por las muestras pertenecientes al símbolo anteriormente transmitido puede degradar significativamente la transmisión debido a la quiebra de ortogonalidad de la señal, lo que resulta en ICI (*Intercarrier Interference*) [17].

El tiempo de guarda o *intervalo de guarda* (GI) se refiere a aquel período que se deja entre símbolos OFDM consecutivos. Esta técnica tiene la finalidad de evitar la interferencia intersímbolo (ISI) e intercanal (ICI) en canales multitrayectoria. De acuerdo a la teoría, para cumplir con estos objetivos, su longitud debe corresponder al menos a la misma longitud del *tiempo máximo de exceso de retardo* (*maximum excess delay time*) o T_m que caracteriza el canal.

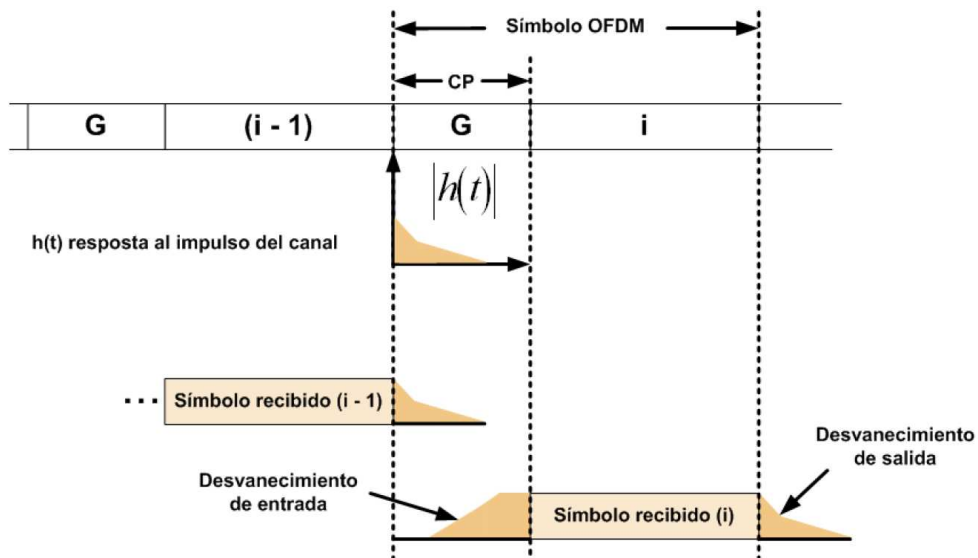


Figura 53. Desvanecimiento de entrada / salida en símbolos OFDM

Para OFDM, ya es prácticamente un estándar el utilizar un *prefijo cíclico* durante este intervalo. De esta manera se completa el símbolo OFDM: añadiendo por delante de las N_{FFT} muestras que emite la iFFT, G muestras que no son más que copias de las últimas G del símbolo. Entonces debemos distinguir entre un período útil T_u y el de guarda T_g dentro del período de símbolo T_{sym} . Lo que inevitablemente reducirá la eficiencia de la transmisión, no obstante los beneficios de la técnica

La secuencia del símbolo se completa con las G copias: $\{X_{-G}, X_{-G+1}, \dots, X_{-1}, X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N_{FFT}-2}, X_{N_{FFT}-1}\}$, donde la subsecuencia $\{X_{-G}, X_{-G+1}, \dots, X_{-1}\} = \{X_{N_{FFT}-G}, X_{N_{FFT}-G-1}, \dots, X_{N_{FFT}-2}, X_{N_{FFT}-1}\}$.

De acuerdo con los conceptos establecidos anteriormente, se generan las siguientes relaciones:

$$T_{sym} = T_u + T_g$$

para el tiempo total de símbolo, y

$$T_g = G \times T_s$$

para el tiempo de guarda, donde:

$$T_u = N_{FFT} / f_s$$

y f_s (frecuencia de muestreo)

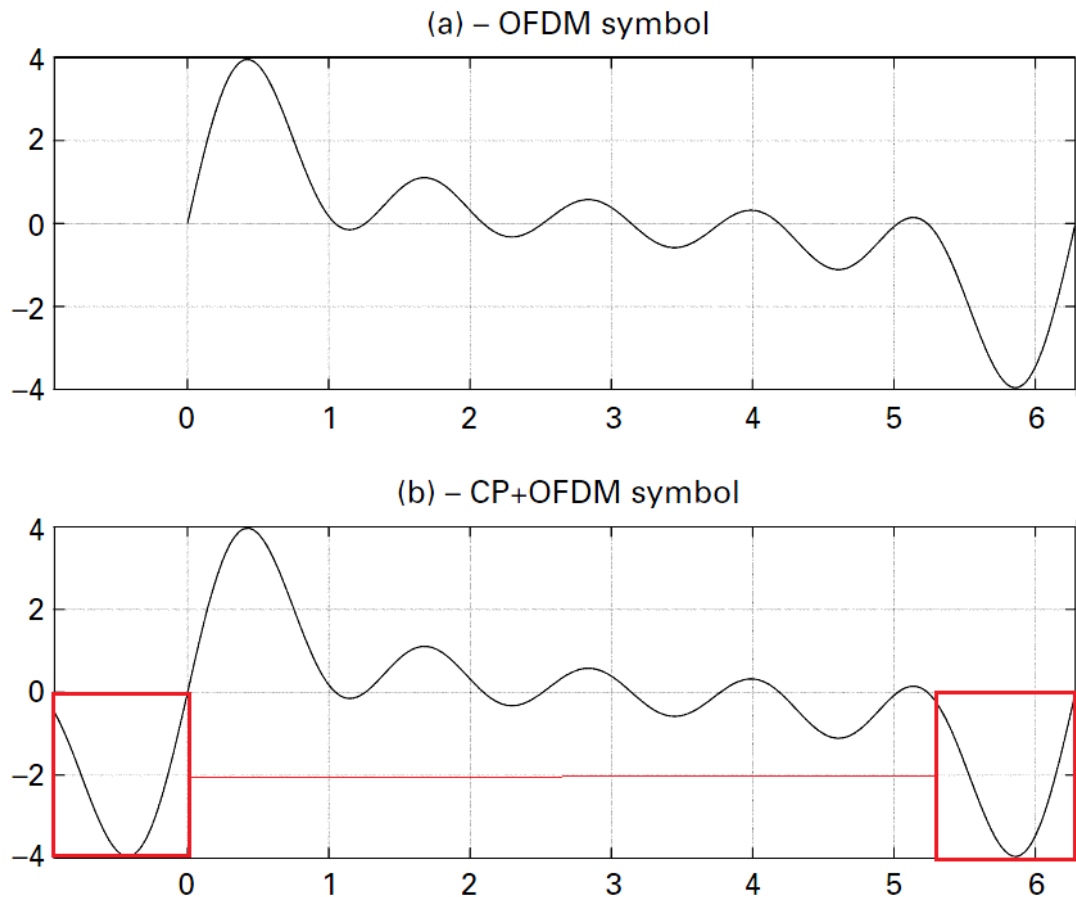


Figura 54. Símbolo OFDM sin y con prefijo cíclico

La ventaja de añadir este prefijo cíclico es que se puede simular el desarrollo de la convolución cíclica del canal, lo cual implica la ortogonalidad sobre los canales dispersivos cuando la longitud del prefijo cíclico sea mayor que la respuesta impulsiva del canal.

2.6.6 CONSTELACIONES BÁSICAS

Para conseguir la modulación OFDM los datos de entrada se "mapean" en símbolos OFDM, lo que significa que modulan a cada una las subportadoras individuales. Esta modulación puede ser de diferentes tipos, pero en el sistema LTE las constelaciones contempladas son 4QAM, 16QAM y 64QAM, que se ilustran en la figura siguiente [18]:

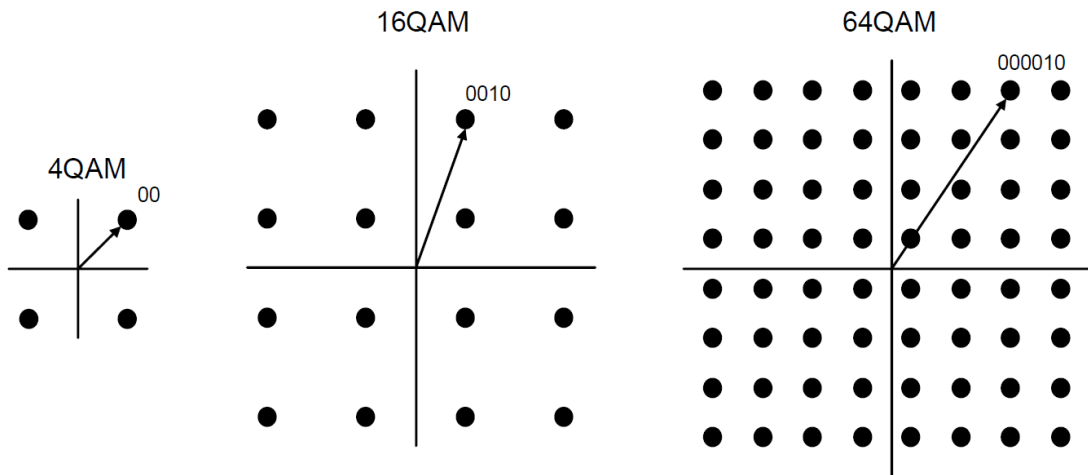


Figura 55. Constelaciones 4QAM, 16 QAM y 64QAM

Dependiendo de la constelación utilizada, cada subportadora transportará 2, 4 u 8 bits de información. Cada punto de la constelación se puede representar por un número complejo. Así, la primera etapa en el proceso de modulación OFDM es el de mapear los grupos de 2, 4 u 8 bits en las componentes real e imaginaria que corresponden al número complejo en la constelación. Cada constelación tiene una robustez propia con respecto a la relación C/N mínima que puede tolerar para una demodulación correcta. En términos aproximados, 4QAM es de cuatro a cinco más robusta que 64QAM.

Estos números complejos corresponden a una representación en el dominio de la frecuencia y para trasladarlos al dominio del tiempo es necesario aplicar la transformada inversa de Fourier. Estos dos procesos, el mapeo del flujo binario de entrada en símbolos complejos de la constelación y su transformación inversa bajo Fourier, constituyen la primera parte del proceso de modulación OFDM.

El uso de sistemas de modulación de orden superior como 16-QAM y 64-QAM son necesarios en esta interfaz radioeléctrica para conseguir aumentar la velocidad de transmisión de los datos. Modulaciones de más alto nivel proporcionan mayor número de bits eficaces por símbolo y por lo tanto mayor tasa binaria. Por el contrario, estas modulaciones presentan constelaciones más complejas y son más sensibles a interferencias, por lo que necesitarán mayores requisitos de potencia para mantener el mismo EVM (Error Vector Magnitude) representado en la figura siguiente.

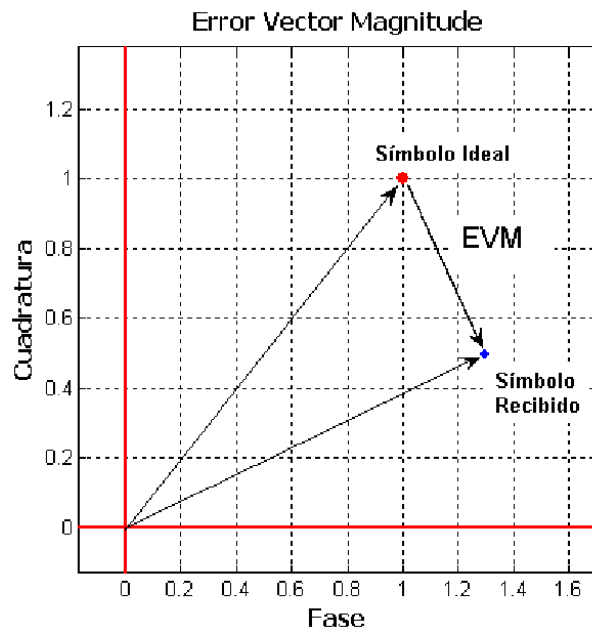
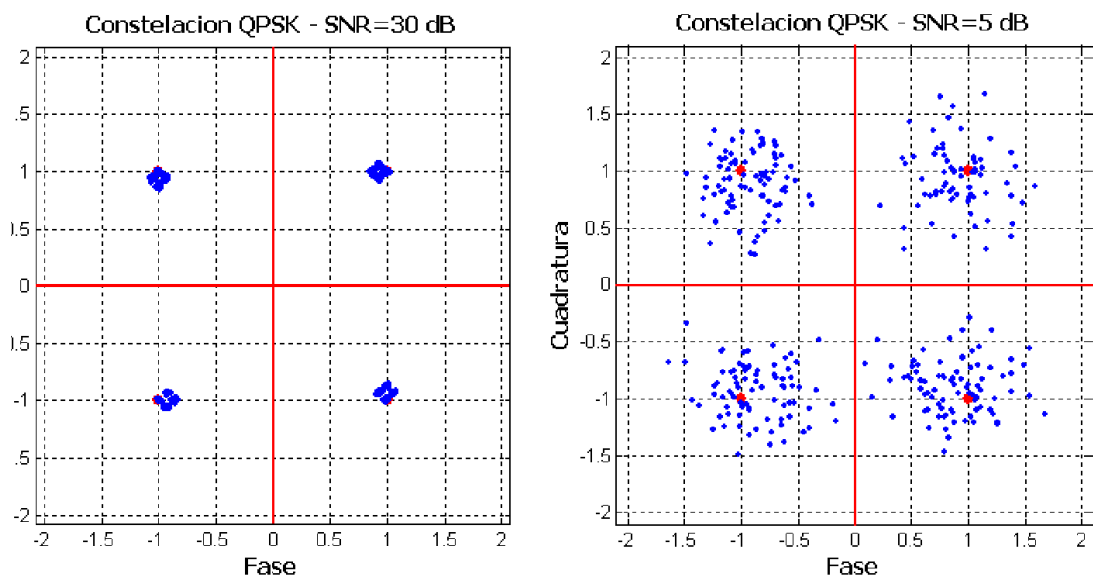


Figura 56. Error Vector Magnitude

El EVM representa la diferencia vectorial entre la posición ideal del símbolo en la constelación frente al valor detectado en condiciones no ideales de interferencia, cuantificado como el módulo del vector diferencia entre ambos. Cabe destacar que está directamente ligado al porcentaje de error de los símbolos y nos da una idea de la complejidad de la modulación.

Como es sabido, conforme la SNR baja la constelación se degrada. Una de las principales razones del deterioro de la SNR es el acceso al medio de más usuarios así como la cantidad de tráfico que está siendo gestionado por cada uno de ellos. Conforme la constelación se hace más compleja la degradación de los símbolos se hace más severa. Por este motivo para una correcta demodulación de los datos, será necesario transmitir más potencia a medida que utilizamos constelaciones de orden superior

A modo de ejemplo se muestran en diferentes constelaciones para QPSK, 16-QAM y 64-QAM para un flujo de bits transmitido por el mismo canal en diferentes condiciones de SNR [18]:



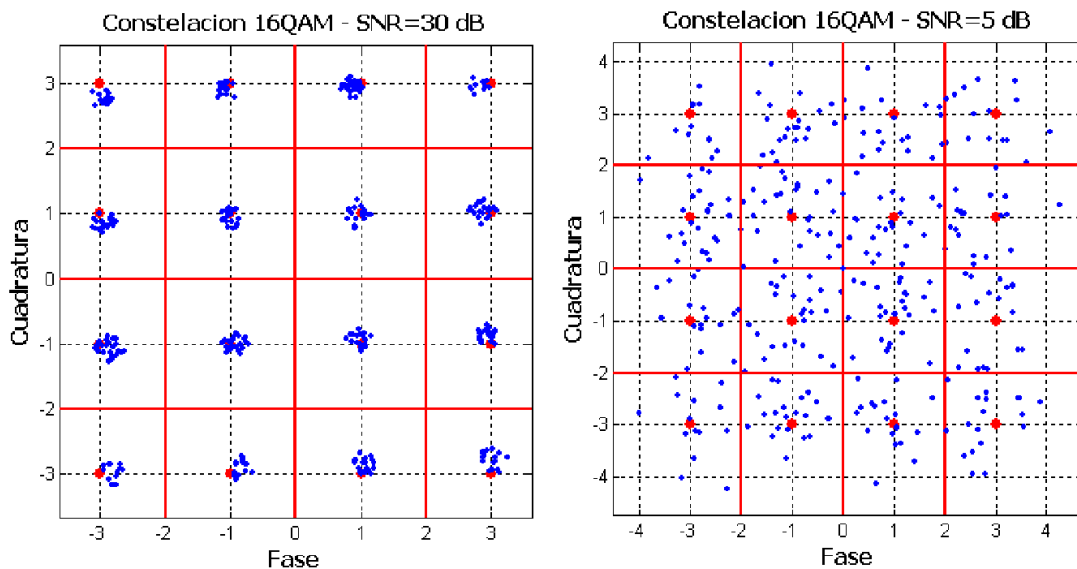


Figura 57. Constelaciones QPSK y 16QAM

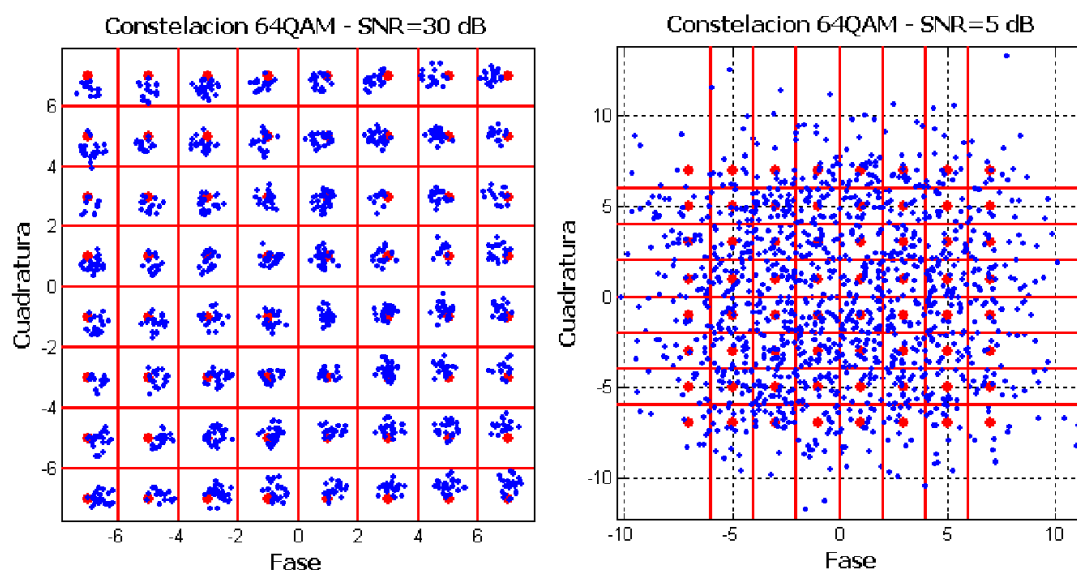


Figura 58. Constelación 64QAM

LTE, al igual que estándares anteriores (desde *Release 5*) de 3GPP, utiliza modulaciones y códigos adaptativos (AMC) para mejorar las prestaciones y disminuir el número de errores en el canal

2.6.7 ESQUEMA DE UN SISTEMA OFDM

A continuación se muestra un esquema básico por bloques para implementar un emisor y un receptor OFDM, y se enuncia el proceso que sigue la información:

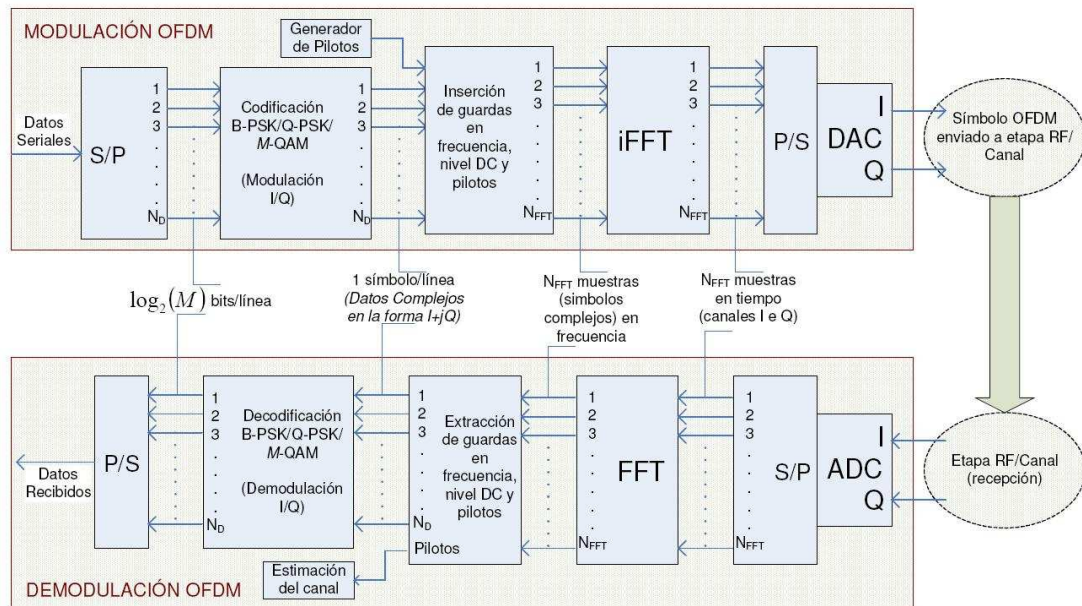


Figura 59. Modulación y demodulación OFDM

Los bits a transmitir se introducen en el sistema en serie y lo primero que nos encontramos es un bloque serie-paralelo. A continuación se agruparán los bits para codificarlos, generalmente, mediante un modulador QAM y enviará un grupo de símbolos al siguiente bloque, la IFFT. Aquí se realiza la inversa de la Transformada Discreta de Fourier. Algunas entradas del bloque IFFT pueden dejarse a cero para facilitar el filtrado y posteriormente añadimos el *Cyclic Prefix* (CP). A continuación, volvemos a enviar los datos en serie para poder hacer la conversión digital-analógica. Luego pasamos por un filtro paso bajo que recupera la réplica de la señal en banda base y enviamos la información a la etapa RF.

Cuando entra señal en el receptor y ha pasado por la etapa de RF, realizamos las funciones inversas: pasamos de un flujo de datos serie a uno paralelo y quitamos el prefijo cíclico. Después realizamos la FFT, ecualizamos y demodulamos los símbolos QAM para obtener los bits originales

2.6.8 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

OFDMA es la versión multiusuario de OFDM. Se utiliza para conseguir que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras (*subcarriers*) que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios.

El acceso multiple OFDMA permite realizar *scheduling* frecuencial oportunista, que consiste en que, con periodicidad de TTI, se asigna cada sub-banda (grupo de subportadoras) del espectro disponible a aquel usuario cuyo canal presente mejor SNR en esa sub-banda. De esta forma se maximiza el *throughput* global de la celda.

Para conseguir una mayor eficiencia, el sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue

cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos, proporcionando una mejor eficiencia espectral del sistema que OFDM.

Este método de acceso permite asignar un grupo diferente de subportadores a cada uno de los usuarios garantizando así, una diferente calidad de servicio (QoS) en función del ancho de banda asignado. Es decir, OFDMA permite establecer una velocidad de conexión y una probabilidad de error individualmente para cada usuario.

Podemos entenderlo como una combinación del OFDM con TDMA (acceso múltiple de división de tiempo), multiplicándonos diferentes usuarios mediante un acceso por división en tiempo.

OFDMA se puede también describir como un acceso donde repartimos los recursos en el espacio formado por el eje temporal y el eje frecuencial. Se asigna la información a lo largo de las subportadoras en la combinación del dominio frecuencial y el acceso múltiple en el dominio temporal (espacio tiempo-frecuencia).

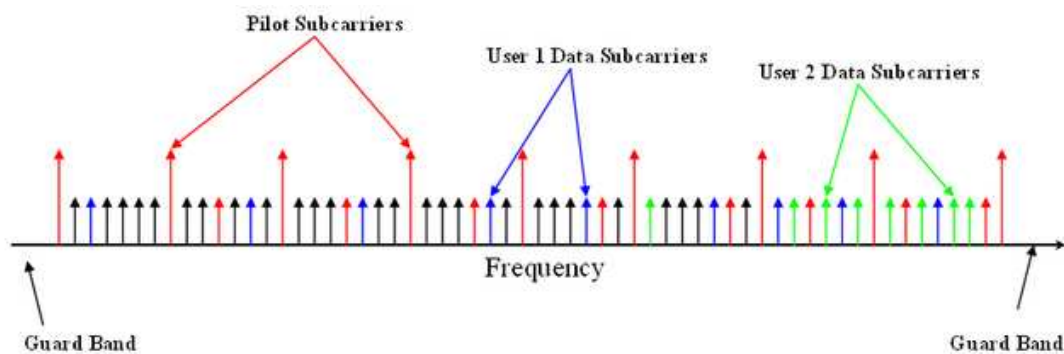


Figura 60. Subportadoras e información de usuario

OFDM es un esquema de modulación, mientras que OFDMA es un esquema de modulación y de acceso. En la imagen adjunta se muestra la diferencia entre ambas:

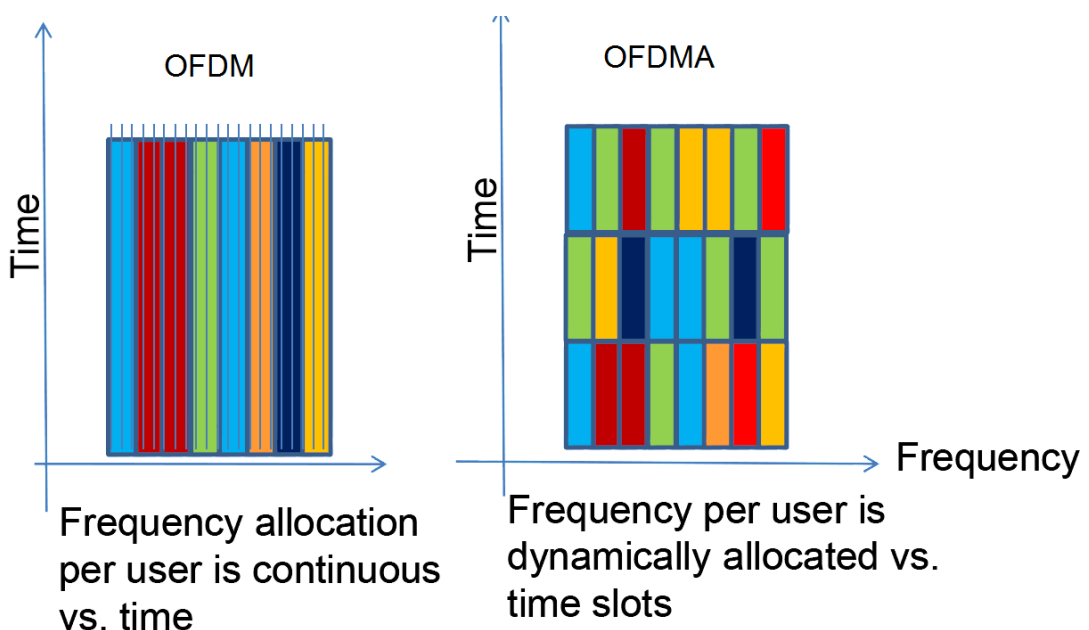


Figura 61. Diferencia entre OFDM y OFDMA

Para obtener las ventajas de OFDMA es vital que sea la estación base quien gestione los recursos radio. Por este motivo, en LTE todos los protocolos radio del plano de usuario acaban en el eNodeB.

A modo de resumen, podemos decir que el empleo de la técnica de acceso múltiple OFDMA conlleva las siguientes ventajas [8]:

1- Diversidad multiusuario: Mediante OFDMA la asignación de subportadoras a usuarios se lleva a cabo dinámicamente, pudiéndose cambiar en períodos cortos de tiempo dicha asignación a través de estrategias de *scheduling*. De esta forma, teniendo en cuenta que el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, y que dichos desvanecimientos serán independientes para cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada subportadora aquél usuario que presente un mejor estado del canal (esto es, perciba una mejor relación señal a ruido), lo que se traducirá en una mejor utilización de la banda disponible para conseguir una mayor velocidad de transmisión, esto es, una mayor eficiencia espectral. Este procedimiento se suele denominar *scheduling* en el dominio de la frecuencia, como ya se ha comentado.

2 - Diversidad frecuencial: Tal y como se ha comentado, es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, suficientemente separadas como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia

3 - Robustez frente a la propagación multicamino: Gracias a la aplicación del prefijo cíclico, la técnica OFDMA es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica resultante de la propagación multicamino y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan más eficientes y menos complejas que las técnicas de ecualización clásicas en el dominio temporal, particularmente cuando se tiene que efectuar una transmisión de banda ancha y en consecuencia se está ante canales muy dispersivos. Esto es particularmente relevante cuando se pretenden emplear bandas de transmisión superiores a 5 MHz, como ocurre con LTE, en que se pretende llegar hasta los 20 MHz

4 - Flexibilidad en la banda asignada: La técnica OFDMA proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de los requerimientos de servicio de cada uno, simplemente a base de la asignación de más o menos subportadoras por usuario.

5 - Elevada granularidad en los recursos asignables: Al subdividir la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, lo que resulta útil para acomodar servicios con diferentes requerimientos de calidad.

6 - Elevado grado de utilización de la banda asignada: Gracias al empleo de la transmisión OFDM la transmisión multiportadora se consigue con un espaciado mínimo entre las diferentes subportadoras utilizadas, existiendo de hecho una cierta superposición en el espectro ocupado por éstas sin que ello afecte a la recuperación de la señal transmitida. Por el contrario, otras técnicas

de transmisión diferentes de OFDM requerirían una cierta banda de guarda entre los diferentes canales, lo que reduciría el grado de utilización de la banda asignada y en consecuencia la eficiencia espectral.

7 - Sencillez de implementación en el dominio digital: Esto es así gracias a la posibilidad de emplear chips que efectúan los procesos de FFT/IFFT de forma rápida

2.7 SC-FDMA (Single-Carrier FDMA)

2.7.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de OFDM es el impacto que tiene sobre los amplificadores de potencia. Los amplificadores son dispositivos que, idealmente, deberían funcionar de forma lineal, pero que cuando la señal de entrada es relativamente elevada, dejan de hacerlo. La distorsión que se produce en la respuesta del amplificador genera errores en la señal transmitida e interferencias en las bandas adyacentes [20].

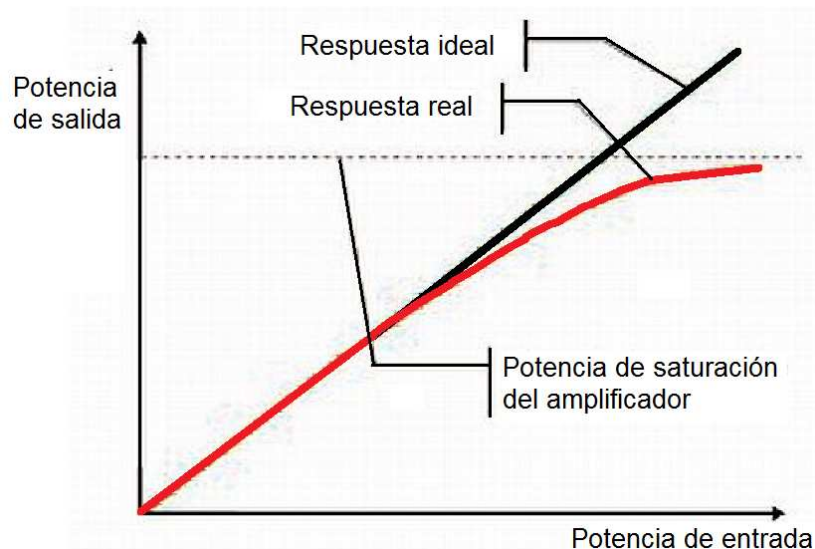


Figura 62. Distorsión con señal entrada elevada

Esto se traduce en dos tipos de problemas. Por un lado, para soportar las altas tasas binarias objetivo, es necesario utilizar modulaciones multinivel, como 16QAM y 64QAM, que requieren que el amplificador opere en la zona en la que su comportamiento es más lineal, alejado de la potencia de saturación. Mientras que con una modulación QPSK (que soporta la transmisión de dos bits por hertzio) la distorsión de la señal soportable, medida mediante el parámetro EVM (*Error Vector Magnitude*) puede ser del 10%, con 64 QAM (que soporta 6 bits por hertzio) sólo puede ser del 2,5%.

Por otro, debido al uso de una modulación multiportadora, la potencia en cada instante es muy variable y depende de cómo se combinen los símbolos que se transmiten por cada una de las subportadoras. El resultado es que la relación entre la potencia media y la potencia de pico (PARP - *Peak to Average Power Ratio*) es muy elevada. Esto es fácil de comprobar al observar cómo es la señal en el dominio del tiempo.

Si tenemos un grupo de señales individuales y ortogonales que componen un símbolo:

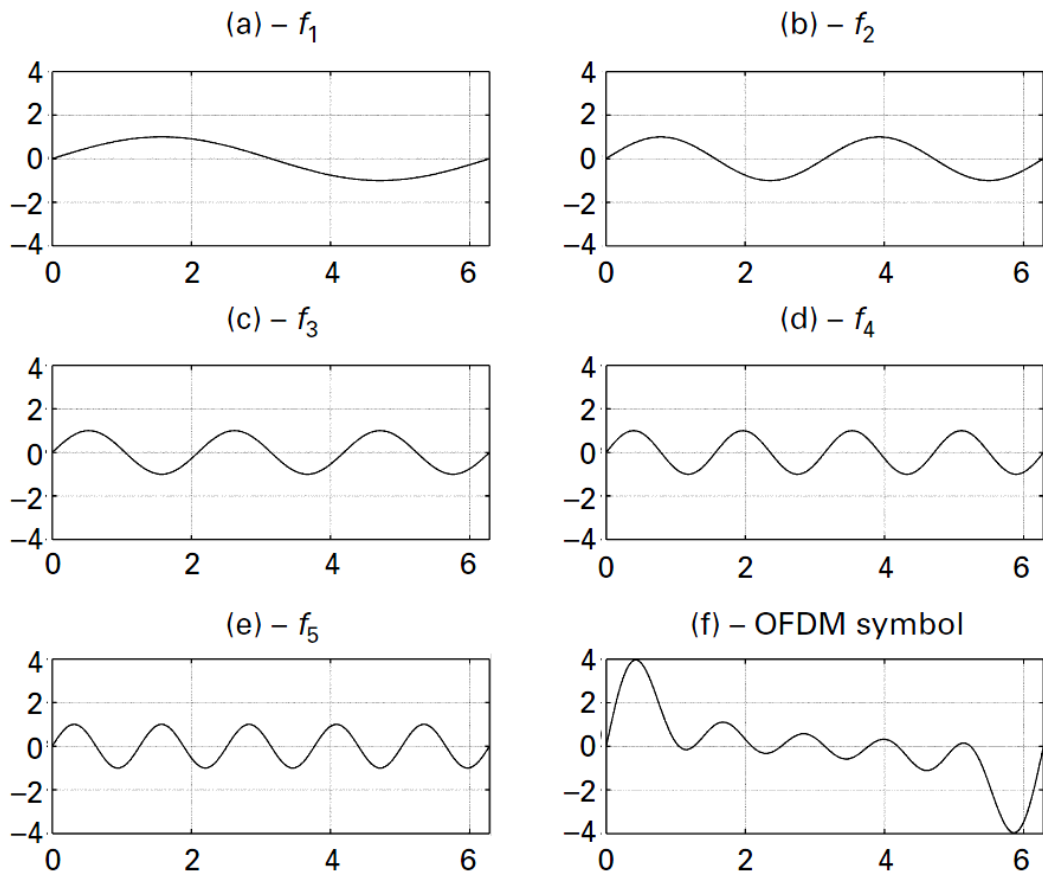


Figura 63. Grupo de señales individuales y ortogonales

Si las sinusoides de todas las subportadoras coincidieran en un máximo simultáneamente la señal resultante tendría una amplitud N veces la de cada portadora. La relación entre la potencia de pico y media en dB teórica sería diez veces el logaritmo decimal de N (en la práctica es menos). Por tanto, el problema aumenta cuando lo hace el ancho de banda utilizado y, por tanto, el número de subportadoras (generalmente potencias de 2, aunque algunas subportadoras no se utilizan; en LTE van de 72 para un ancho de banda de 1,4 MHz a 1200 para el de 20 MHz).

La consecuencia es que los amplificadores deben trabajar en un régimen de baja eficiencia, medida como la relación entre la potencia de la señal a la salida del amplificador y la potencia que se le ha de suministrar al mismo (al parámetro que comúnmente se utiliza para caracterizar esta eficiencia se le denomina *power added efficiency* o PAE). Esto se debe a que si la potencia media de la señal que debe entregar el amplificador es, por ejemplo de 250 milivatios y la relación entre la potencia media y de pico es de 10 dB, se debe utilizar un amplificador cuya potencia de saturación sea de 2,5 vatios [20]. Comparados con amplificadores cuya potencia de saturación sea menor, su consumo de potencia será mucho más elevado.

Estas limitaciones afectan fundamentalmente a los terminales móviles. Por supuesto, estos mismos problemas se dan en las estaciones base, pero en este caso se dispone de mayor flexibilidad para implementar mecanismos que permitan solventar estas limitaciones y por supuesto las restricciones de consumo eléctrico no son tan acuciantes.

Por todo lo expuesto, en la especificación de LTE se adoptó para el enlace ascendente (el que va del terminal a la red) un tipo de modulación denominado SC-FDMA (SC es el acrónimo de *Single Carrier*), que, por un lado, mantiene las ventajas de OFDM a la hora de combatir el efecto del multitrayecto y, por otro, minimiza los requisitos sobre los amplificadores de potencia. Por otro lado, la relación de potencia media a pico en SC-FDMA no crece con el ancho de banda utilizado.

2.7.2 DESCRIPCIÓN DE SC-FDMA

Básicamente lo que se hace en SC-FDMA es que los símbolos en el dominio del tiempo se convierten al dominio de la frecuencia usando la DFT; una vez en el dominio de la frecuencia son mapeados a la localización deseada dentro del canal de banda ancha antes de ser convertidas de nuevo al dominio del tiempo usando iFFT. Finalmente, se inserta el prefijo cíclico.

Para entender mejor el concepto de SC-FDMA, vamos a ver la siguiente comparación gráfica con el esquema de modulación OFDMA que nos ayudará a comprender las diferencias entre ambas:

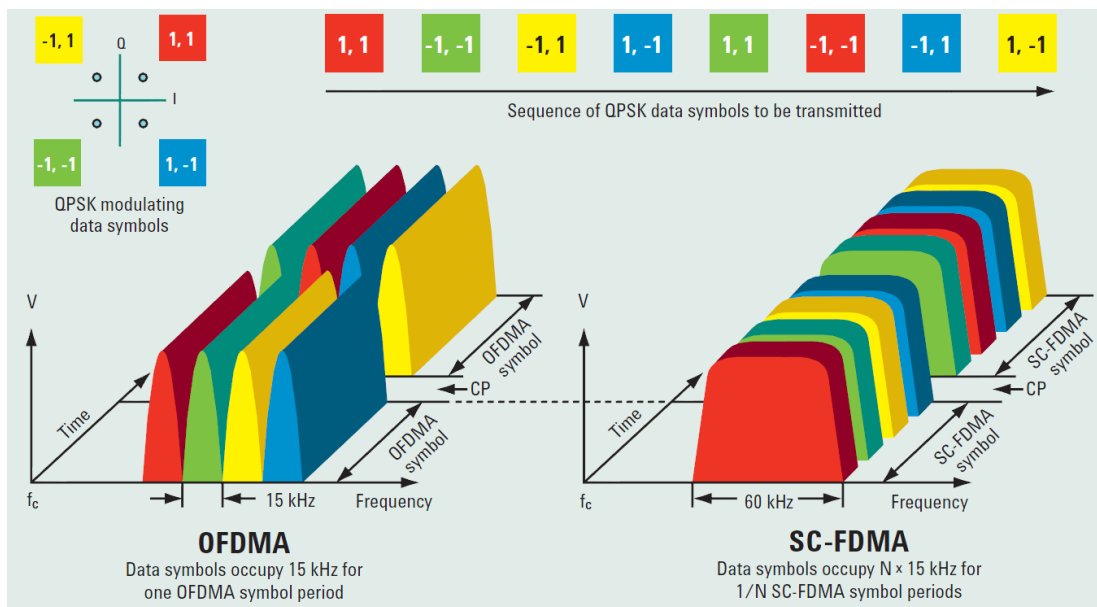


Figura 64. Esquema de modulación OFDMA y SC-FDMA

En la parte izquierda de la figura, M subportadoras adyacentes de 15Khz son moduladas cada una durante un periodo de símbolo OFDMA de $66,7\mu s$ para un símbolo QPSK. En este ejemplo de 4 subportadoras, 4 símbolos son transmitidos en paralelo. Tras un símbolo OFDMA, se inserta el prefijo cíclico CP y se transmiten en paralelo los próximos 4 símbolos. Para una mayor claridad visual el CP se muestra vacío, pero como se ha explicado con anterioridad se rellena con una copia de la parte final del siguiente símbolo., lo que significa que la potencia de transmisión es continua pero tiene una discontinuidad de fase en la frontera del símbolo. Para generar la señal transmitida, se ejecuta la iFFT sobre cada portadora para crear M señales en el dominio del tiempo. Éstas a su vez son sumadas vectorialmente para crear la forma de onda final de transmisión en el dominio del tiempo [21].

Por el contrario, la generación de la señal SC-FDMA comienza con un proceso especial de precodificación pero luego continúa de manera similar a OFDMA. Sin embargo, antes de entrar en más detalles sobre el proceso de generación nos

resultará de ayuda describir el resultado final tal y como se muestra en la parte derecha de la figura anterior. La diferencia más obvia entre los 2 esquemas es que OFDMA transmite los 4 símbolos QPSK en paralelo, uno por subportadora, mientras que SC-FDMA transmite los 4 símbolos en serie a una tasa 4 veces mayor, con cada símbolo ocupando un ancho de $M \times 15$ kHz.

Visualmente, la señal OFDMA es claramente multi-carrier con un símbolo por subportadora, mientras que la señal SC-FDMA se asemeja más a una single-carrier (de ahí el "SC" en el nombre SC-FDMA) donde cada símbolo es representado por una señal más ancha. Hay que recalcar que tanto la longitud de símbolo de OFDMA como la de SC-FDMA es la misma ($66,7 \mu\text{s}$); sin embargo, el símbolo SC-FDMA contiene M "sub-símbolos".

Es la transmisión paralela de múltiples símbolos lo que genera el alto y contraproducente PARP en OFDMA. Transmitiendo los M símbolos en serie a una velocidad M veces mayor, el ancho de banda ocupado por SC-FDMA es el mismo que en OFDMA, pero de manera crucial el PARP es el mismo que el que tenemos en los símbolos originales. Sumando conjuntamente muchas formas de onda QPSK de banda estrecha generaremos siempre mayores picos que los que tendríamos en una forma de onda *single-carrier* de banda ancha de SC-FDMA. Conforme el número de sub-portadoras M aumenta, el PARP de OFDMA con una modulación de datos aleatoria se aproxima a unos estadísticos de ruido Gaussiano, pero con independencia del valor de M , el PARP en SC-FDMA permanece similar al de los símbolos originales [21].

2.7.3 MODULACIÓN SC-FDMA

SC-FDMA es una técnica de acceso múltiple que utiliza una modulación de portadora única, con un multiplexado ortogonal en frecuencia con ensanchamiento por DFT y ecualización en el dominio de la frecuencia. Tiene una estructura y desempeño similar a OFDM. La estructura del transmisor y receptor del SC-FDMA y OFDM se muestran a continuación [22]:

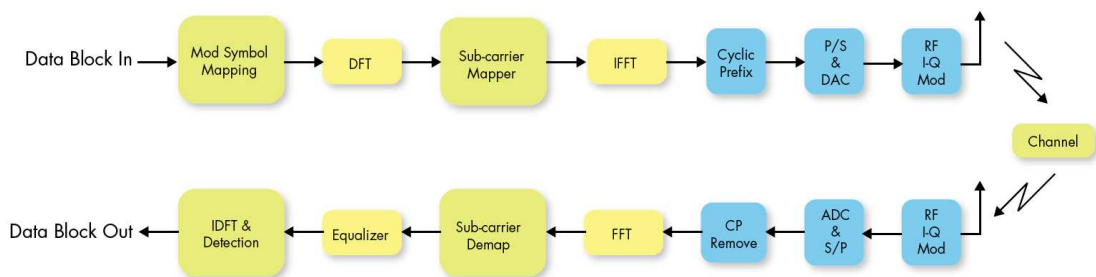


Figura. Transmisor y receptor SC-FDMA

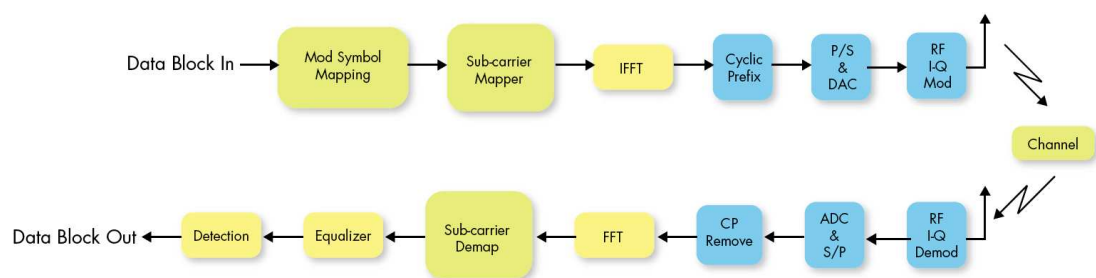


Figura 65. Transmisor y receptor OFDMA

Es evidente que las estructuras de OFDM y SC-FDMA son muy similares excepto por el bloque de DFT antes del mapeo a la subportadora, por lo que SC-FDMA puede ser considerado un sistema OFDM con un mapeo de DFT.

La principal diferencia entre OFDM y SC-FDMA es el mapeo de DFT en el transmisor. Después del mapeo de los bits de datos en los símbolos de modulación, el transmisor agrupa los símbolos de modulación en bloques de N símbolos. Un DFT de N -puntos transforma estos símbolos en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Las muestras en el dominio de la frecuencia son mapeadas a M subportadoras, donde M es normalmente mas grande que N . De igual manera que en OFDM, una IFFT de M -puntos es usada para generar las muestras en el dominio del tiempo de estas subportadoras, a las cuales les es agregado un prefijo cíclico, un convertidor paralelo-serie, un DAC y un subsistema de RF [22].

Cada dato de símbolo es transformado por una DFT antes de ser mapeado a una subportadora, es por eso que a SC-FDMA también se le conoce como OFDM DFT precodificado. En OFDM cada dato de símbolo es montado en una subportadora individual. En SC-FDMA, múltiples subportadoras montan cada símbolo gracias al mapeo de las muestras en el dominio de la frecuencia de los símbolos a las subportadoras. Así como cada símbolo es ensanchado sobre múltiples portadoras, SC-FDMA tiene ganancia por esparcimiento o ganancia por diversidad de frecuencia en canales selectivos en frecuencia. Por lo tanto, SC-FDMA puede ser visto como OFDM con ensanchamiento en frecuencia p OFDM DFT ensanchado.

La salida del DFT de los símbolos es mapeado a un grupo de portadoras, este proceso es llamado mapeo de subportadora. El mapeo de subportadora asigna a la salida del DFT valores complejos como las amplitudes de ciertas subportadoras. El mapeo a subportadora puede ser clasificado de dos maneras: mapeo localizado o mapeo distribuido.

En mapeo localizado, la salida del DFT son mapeados a un grupo consecutivo de subportadoras que equivalen a una fracción del ancho de banda del sistema [22].

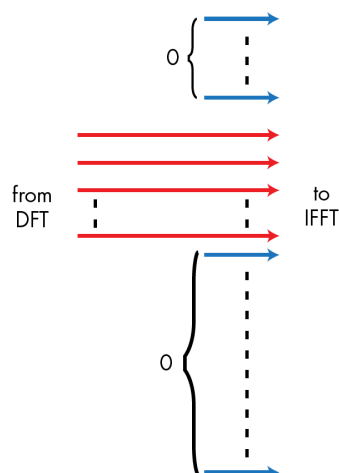


Figura 66. Mapeo localizado

En mapeo distribuido, la salida del DFT es asignada a subportadoras distribuidas sobre todo el ancho de banda de forma no continua, y las subportadoras restantes se ponen en amplitud cero. Un caso especial de SC-FDMA se llama SC-

FDMA entrelazado, donde las subportadoras ocupadas son espaciadas equidistantemente sobre todo el ancho de banda [22].

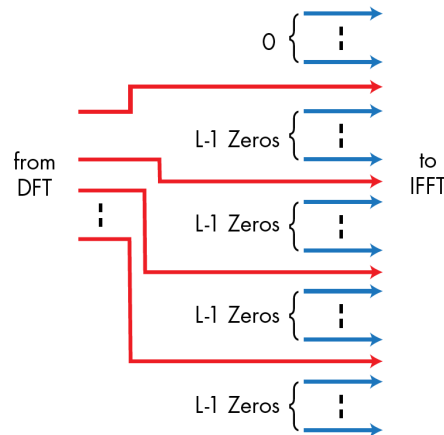


Figura 67. Mapeo distribuido

Suponiendo que tres usuarios compartan 12 subportadoras, cada usuario tiene un bloque de cuatro datos de símbolo para transmitir en un tiempo. La salida del DFT de esos bloques de datos tiene cuatro muestras complejas en el dominio de la frecuencia, las cuales son mapeadas sobre 12 subportadoras usando diferentes esquemas de mapeo.

SC-FDMA ofrece una ganancia de diversidad de frecuencia, ya que todos los datos de información son ensanchados sobre múltiples subportadoras por un mapeo de DFT. Por lo que SC-FDMA es más fuerte con respecto al desvanecimiento selectivo en frecuencia y ofrece una ganancia de diversidad de frecuencia a la información ensanchado a lo largo de ancho de banda del sistema. SC-FDMA localizado en combinación con programación de canales dependientes se puede ofrecer diversidad multiusuario en condiciones de canales selectivos en frecuencia.

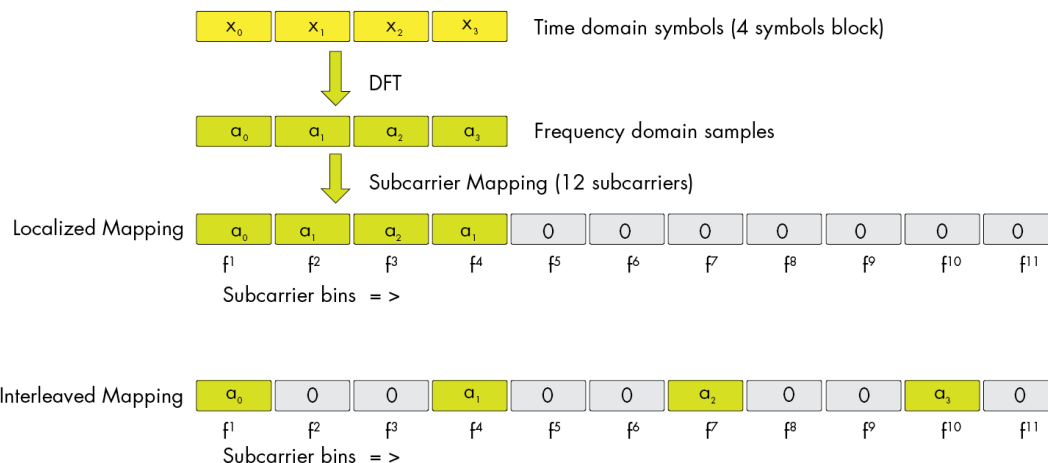


Figura 68. Mapeo de DFT

El uso del término de portadora única no es muy obvio analizando la estructura de SC-FDMA. A diferencia de OFDM donde cada símbolo es montado en una subportadora individual, el transmisor SC-FDMA monta los símbolos de datos sobre un grupo de subportadoras que son transmitidos simultáneamente. En otras palabras, el grupo de subportadoras que monta cada símbolo de datos puede ser visto como una banda de frecuencia donde se monta datos secuencialmente como en el estándar FDMA. Para algunos de los mapeos de las

subportadoras, la representación en el dominio del tiempo de la salida de la IFFT tiene mayor representación en la señal SC-FDMA. Puede ser demostrada matemáticamente que las muestras de banda base de SC-FDMA en el dominio del tiempo después de IDFT o IFFT es el conjunto de símbolos de datos original repetido en el dominio del tiempo sobre un periodo de símbolo.

Se muestra en la imagen siguiente una representación en el dominio del tiempo del mapeo distribuido de SC-FDMA [22].

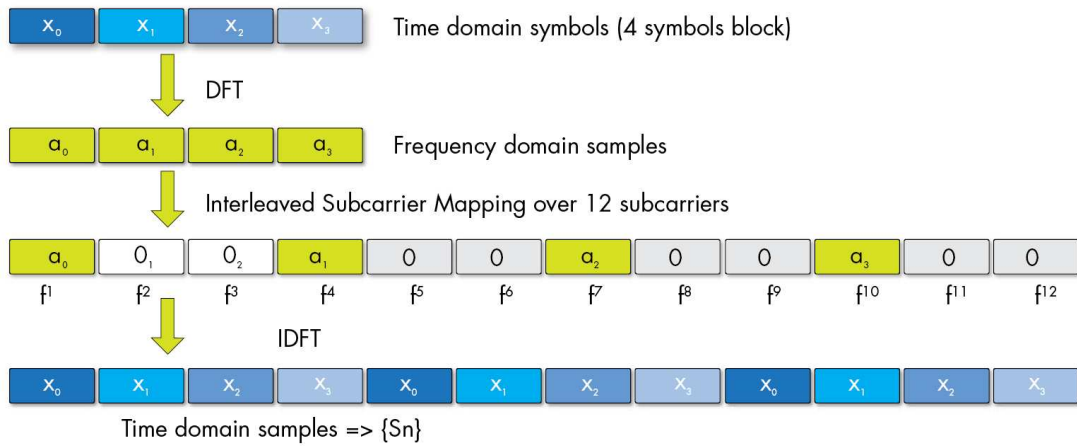


Figura 69. Mapeo distribuido de SC-FDMA en el dominio del tiempo

El esquema SC-FDMA para varios usuarios será el siguiente:

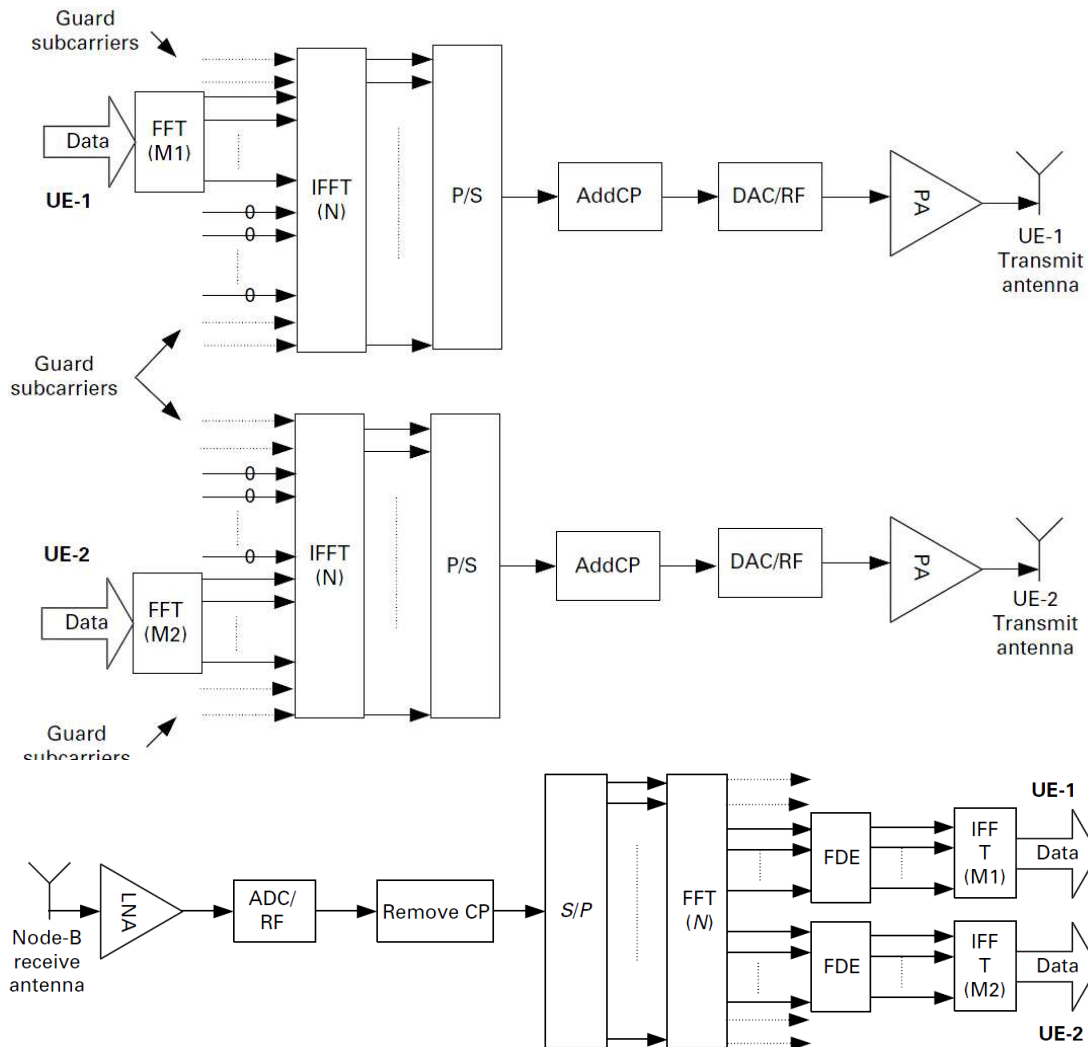


Figura 70. Esquema SC-FDMA para varios usuarios

2.7.4 RESISTENCIA DE SC-FDMA AL MULTICAMINO

Llegados a este punto, es razonable preguntarse como SC-FDMA se hace resistente al multicamino cuando la duración de los símbolos es tan corta. En OFDMA, los símbolos modulados son de una duración constante e igual al periodo de símbolo $66,7\mu s$, pero la duración del símbolo SC-FDMA no es constante en el tiempo, sino que contiene M sub-símbolos de mucha menor duración. La resistencia al multicamino del proceso de demodulación OFDMA está relacionado con la larga duración de los símbolos que se mapean directamente sobre las sub-portadoras. Afortunadamente, es la naturaleza constante de cada sub-portadora, no del símbolo, lo que proporciona resistencia al retraso de propagación [21].

Tal y como se ha visto con anterioridad, la DFT de un símbolo SC-FDMA variable en el tiempo generó un conjunto de ranuras DFT constante en el tiempo durante el periodo de símbolo SC-FDMA, incluso aunque la modulación de los símbolos varíe durante el mismo período.

Es inherente al proceso de DFT que el símbolo SC-FDMA de duración variable (compuesto de M símbolos en serie) se representa en el dominio de la frecuencia por M subportadoras invariables en el tiempo. Por lo tanto, incluso SC-FDMA con sus símbolos de reducida duración se beneficia de la protección contra el multicamino

Puede parecer contradictorio que M contenedores DFT invariables en el tiempo puedan representar plenamente una señal variable en el tiempo. Sin embargo, el principio de DFT se ilustra simplemente considerando la suma de dos ondas sinusoidales en frecuencias diferentes. El resultado es una señal no sinusoidal variable en el tiempo, plenamente representada por dos ondas sinusoidales fijas.

2.8 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

2.8.1 INTRODUCCIÓN

El uso de dispositivos y sistemas de comunicación inalámbricos, ha ganado popularidad en los últimos años, de aquí surge la necesidad de mejorar y optimizar las tecnologías asociadas así como los servicios ofrecidos por los mismos. La creciente demanda y el aumento de la tasa de transmisión que requieren servicios como la transmisión de imágenes, vídeos, internet, etc han impulsado enormemente la investigación en este campo, proponiendo nuevas técnicas de transmisión que consiguen aumentar la tasa de transmisión sin comprometer ni la calidad de servicio ni el limitado ancho de banda disponible y por tanto aumentando la eficiencia espectral [23].

El interés reciente en los sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) se basa en la perspectiva de una mejora de varios órdenes de magnitud en el desempeño de las comunicaciones inalámbricas sin el costo de utilización adicional del espectro. Esto motivó avances en áreas tan diversas como modelado de canal, teoría de la información y codificación, procesamiento de señales, diseño de antenas, etc.

Pero MIMO no es sólo una tecnología aplicable a las LTE. Es la tendencia actual de las investigaciones internacionales en comunicaciones inalámbricas, y numerosos tipos de redes WLAN, WMAN,... así como otros sistemas de comunicaciones móviles celulares como WIMAX Mobile están o estarán provistos de esta tecnología.

En este capítulo se presentan los aspectos más importantes relacionados con los sistemas MIMO, las técnicas asociadas a esta tecnología como así también los beneficios que resultan de la implementación de las mismas.

2.8.2 DIVERSIDAD

Hablamos de diversidad cuando tenemos múltiples copias de la señal transmitida, y según dónde se produzca esta diversidad, distinguimos principalmente las siguientes clases [24]:

- Diversidad en el tiempo, cuando transmitimos varias versiones de la misma señal en instantes diferentes.
- Diversidad en la frecuencia, cuando la señal es transmitida usando distintos canales de frecuencia. Un ejemplo sería OFDM o las técnicas de espectro expandido, ambas explicadas en el capítulo anterior.
- Diversidad en el espacio, cuando se utilizan caminos de propagación diferentes para transmitir la señal. En comunicaciones inalámbricas esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y/o varias antenas receptoras (diversidad en recepción).

Nosotros nos centraremos en la diversidad espacial a través de la diversidad de antenas. Según el número de antenas que encontramos en ambos extremos de la comunicación podemos distinguir los siguientes sistemas, los cuales podemos considerar puntos de partida de la tecnología MIMO:

- SISO (Single Input, Single Output): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena transmisora y una sola antena receptora.



Figura 71. SISO

- MISO (Multiple Input, Single Output): sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas transmisoras pero sólo una antena receptora. También se le conoce como diversidad en transmisión.

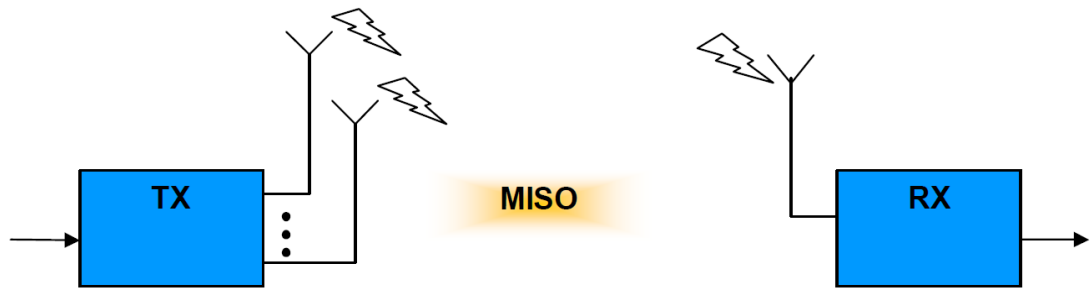


Figura 72. MISO

- SIMO (Single Input, Multiple Output): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena de emisión y dos o más antenas receptoras. Se le conoce como diversidad en recepción.

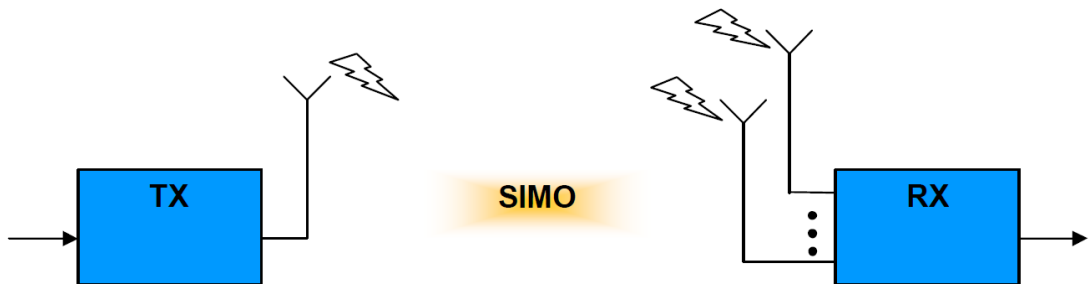


Figura 73. SIMO

Atendiendo a esta clasificación MIMO representará entonces un sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas en el extremo transmisor, y dos o más antenas en el extremo receptor. Es decir, utilizará diversidad en el espacio a través del uso de varias antenas tanto en transmisión como en recepción.



Figura 74. MIMO

No obstante como veremos más adelante MIMO implica algo más que diversidad de antenas

2.8.3 DEFINICIÓN DE MIMO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral de nuestro sistema de comunicaciones inalámbrico [24]. Esto lo consigue a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida).

Antes del desarrollo de MIMO, los sistemas de comunicaciones inalámbricos veían en la propagación multicamino un gran inconveniente que debía de ser solventado, pero MIMO es la primera tecnología que trata el multicamino como una característica inherente a nuestro sistema que hay que aprovechar para poder multiplicar su capacidad. Esto nos permitirá incrementar extraordinariamente la velocidad, el caudal efectivo, el rango, la capacidad y la fiabilidad de nuestro sistema y todo esto sin un incremento del ancho de banda o de la potencia transmitida

En resumen, MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización de técnicas de diversidad espacial y de complejos algoritmos de procesado digital de señales.

2.8.4 PRINCIPALES TÉCNICAS DE MIMO

Explicaremos las principales técnicas de transmisión que utiliza la tecnología MIMO antes de dedicarnos a comprender su funcionamiento. Básicamente podemos dividirlos en tres categorías principales: diversidad de antenas, multiplexación espacial y *beamforming* [24].

2.8.4.1 DIVERSIDAD DE ANTENAS

Los sistemas MIMO usan la diversidad espacial para mejorar las prestaciones del sistema. Según en qué extremo de la comunicación se da la diversidad, diferenciamos entre diversidad en recepción o diversidad en transmisión. Ambas pueden combinarse o darse por separado.

2.8.4.1.1 DIVERSIDAD DE RECEPCIÓN

Es el uso de dos o más antenas en un mismo receptor para generar recepciones independientes de la señal transmitida. Las antenas deben estar bien distribuidas espacialmente, es decir, deben estar separadas al menos por una distancia de coherencia. Dependiendo de cómo usemos las antenas podemos distinguir a su vez tres subtipos [24]:

- Diversidad por selección: elige una de las antenas atendiendo a un criterio concreto: la que reciba la señal de más potencia, la que reciba la señal con mejor SNR, etc.

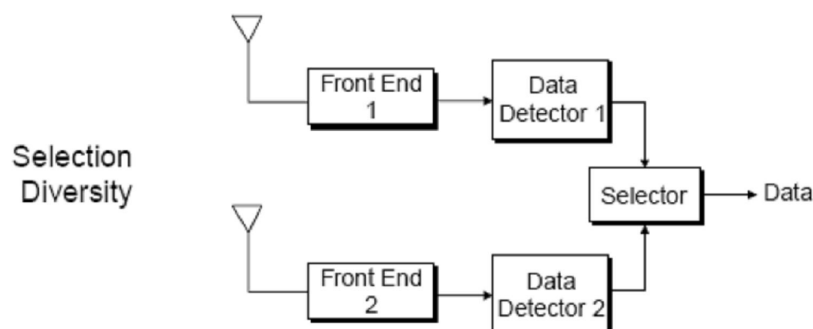


Figura 75. Diversidad por selección

- Diversidad por conmutación: cambia la antena de recepción en base a la que presente mejores niveles de señal recibida.

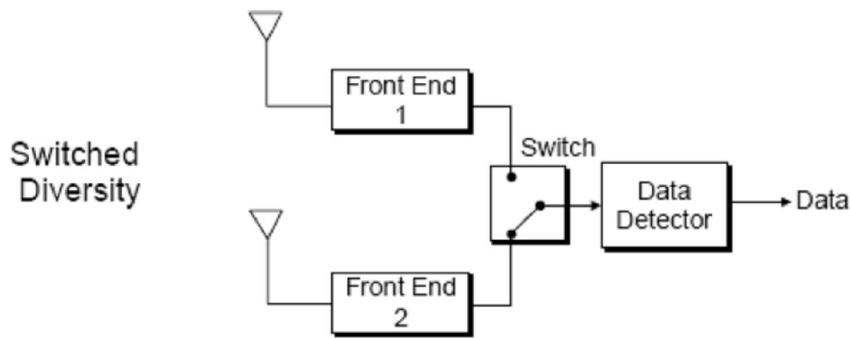


Figura 76. Diversidad de conmutación

- Diversidad por combinación, realiza una combinación lineal ponderada de todas las señales recibidas. Dependiendo de cómo sea la combinación, se divide a su vez varios tipos: de radio máximo, de igual ganancia, etc.

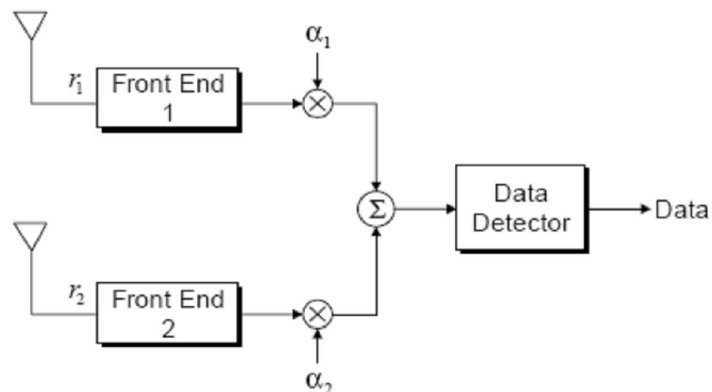


Figura 77. Diversidad por combinación

En la siguiente imagen se muestra una comparativa entre los 2 últimos casos mencionados [25]:

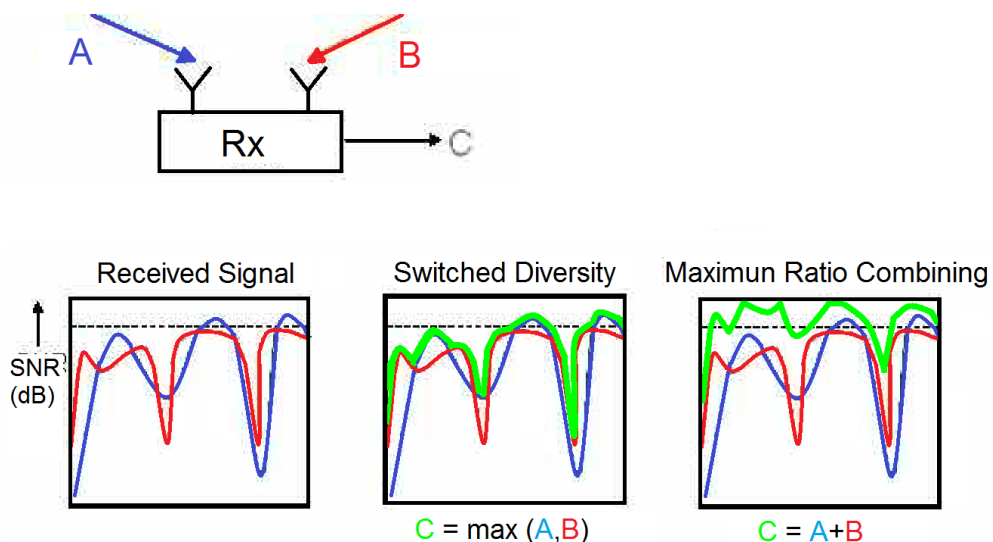


Figura 78. Comparativa diversidad por conmutación o combinación

2.8.4.1.2 DIVERSIDAD DE TRANSMISIÓN

Se refiere al uso de dos o más antenas en el mismo transmisor. Existen varios tipos de diversidad de transmisión: con cambio de antena, con ponderado de frecuencia, a través de diversidad de retraso y a través de diversidad de código. Nosotros nos vamos a centrar en esta última técnica, ya que es la que generalmente usa MIMO

La diversidad de código o técnicas *Space-Time Coding* (STC), en castellano codificación espacio-tiempo, es un método empleado para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos usando diversidad de transmisión. STC se basa en transmitir redundantes copias codificadas de una trama de datos, con la esperanza de que al menos una de ellas llegue al receptor en buen estado y así ser posible su decodificación fiable. Estas copias son distribuidas a lo largo del tiempo y entre todas las antenas transmisoras disponibles.

En la imagen vemos el diagrama de bloques de un transmisor con STC. Para cada símbolo de entrada el codificador espacio-tiempo elige una de las constelaciones para transmitir simultáneamente desde cada antena [24].

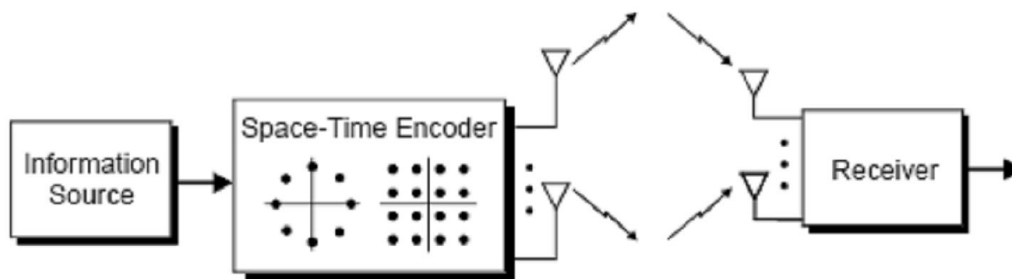


Figura 79. Diagrama de bloques de un transmisor con STC

Hay dos tipos de STC:

- STTC o *Space-Time Trellis Coding*. Las copias son codificadas con un código Trellis (un código convolucional). Con este método obtenemos ganancia de codificación¹ y ganancia de diversidad², además de una mejor BER. Sin embargo el codificador/decodificador es más complejo de implementar debido a que es un decodificador de Viterbi

- STBC o *Space-Time Block Coding*. Las copias son codificadas en conjunto como un bloque de datos. Con este método obtenemos sólo ganancia de diversidad, pero son mucho menos complejos de implementar que STTC porque se basan en procesamientos lineales

1 Se define ganancia de codificación (diversity coding en inglés) como la cantidad de SNR que tenemos que incrementar para que un sistema que no usa codificación tenga la misma BER que ese mismo sistema usando codificación. Se mide en decibelios.

2 Se define ganancia de diversidad (diversity gain en inglés) como el incremento de la SNR del sistema debido al uso de diversidad. Se mide en decibelios.

2.8.4.2 MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL (SPATIAL MULTIPLEXING – SM)

La demultiplexación espacial consiste en la división de una señal de mayor ancho de banda en varias señales iguales de menor ancho de banda. El "apellido" espacial hace referencia a la transmisión, simultánea y por el mismo canal de frecuencia, de cada una de estas señales por medio de antenas diferentes. La multiplexación espacial es justamente el proceso contrario: la combinación de varias señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda. Estas dos técnicas son las que usan los transmisores y receptores MIMO respectivamente para aprovechar la propagación multicamino y es la responsable del aumento de la tasa de transmisión en dichos sistemas.

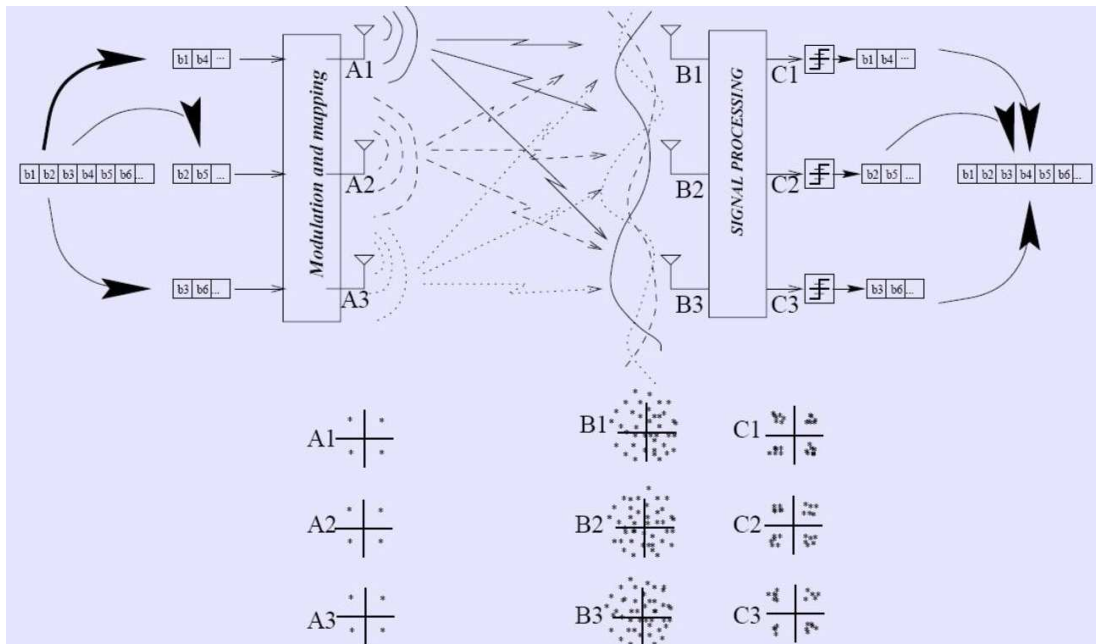


Figura 80. Multiplexación espacial

El orden de multiplexación espacial es el número de flujos de datos transmitidos paralelamente, y su valor máximo estará limitado por el menor del número de antenas transmisoras o de antenas receptoras. El incremento de la eficiencia espectral será proporcional a este orden.

Por último destacar que no podemos entender SM sin un esquema de diversidad de antenas: es obligatorio utilizar varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor, ya que es lo que nos proporciona la diversidad espacial

La siguiente imagen muestra la diferencia entre STBC y SM [26]:

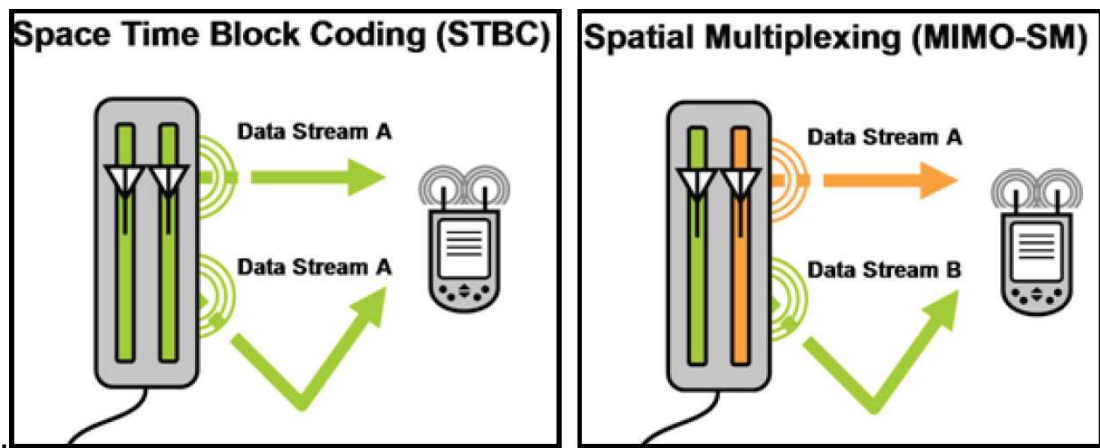


Figura 81. Diferencia entre STBC y SM

2.8.4.3 PRECODING Y BEAMFORMING

Precoding (traducido al castellano, precodificación), en el sentido amplio de la palabra, se refiere a todas las técnicas de procesamiento espacial que se realizan en el transmisor MIMO. Pero en un sentido más específico, hace referencia a un caso especial de beamforming para transmisiones multidimensionales, como las que realizan los sistemas MIMO [24].

Beamforming convencional es una técnica de procesamiento de señales usada para controlar el patrón de radiación de nuestra antena. Aporta la funcionalidad de un filtro espacial y es aplicada tanto en transmisión como en recepción:

- En recepción, *beamforming* se utiliza para incrementar o disminuir la sensibilidad del receptor en una determinada dirección. Por ejemplo, podremos aumentar la sensibilidad en la dirección de la señal deseada, y reducirla en las restantes direcciones, reduciendo así interferencias y ruidos.
- En transmisión, *beamforming* se emplea para configurar el patrón de radiación de nuestra antena. Cambiando la forma del haz, podremos aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección, y minimizar la ganancia de la antena para el resto de direcciones [27].

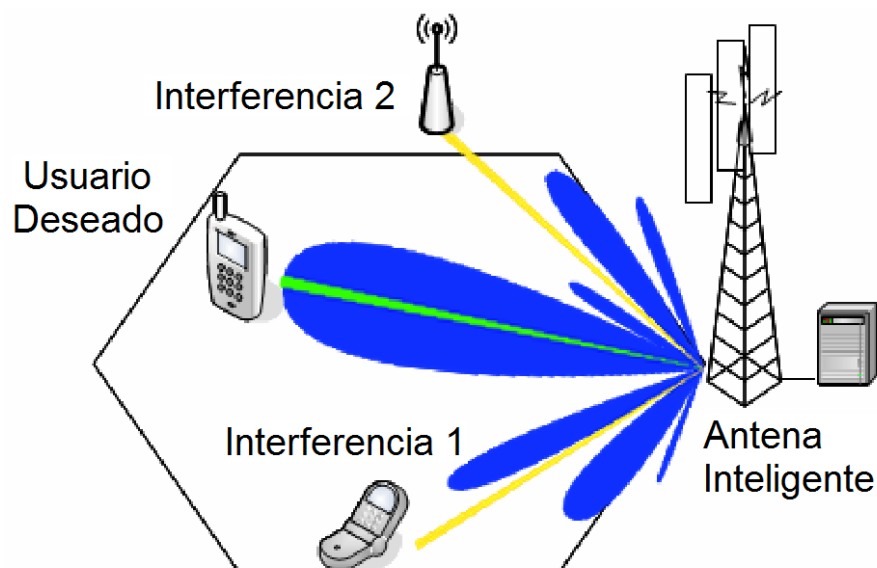


Figura 82. *Beamforming*

2.8.5 FUNCIONAMIENTO DE MIMO

2.8.5.1 PROPAGACIÓN MULTICAMINO. DISTORSIONES DEL CANAL RADIO

Podemos decir que entre un transmisor situado en un punto A y un receptor situado en un punto B hay un camino primario, que definiremos como el más directo entre ambos. Inevitablemente no todas las señales que transmitimos entre estos puntos siguen este camino, sino que debido a las numerosas reflexiones y/o refracciones que sufren con los diversos obstáculos que encuentran a su paso, como montañas, edificios o incluso las mismas capas de la atmósfera, tomarán múltiples caminos distintos para alcanzar al receptor. A esto se le llama propagación multicamino o multitrayecto y es una característica que presenta el canal radio de todos los sistemas de comunicaciones inalámbricos [24]. Veamos cómo afecta este fenómeno a las señales que transmitimos.

Las señales que recorren estos caminos "no primarios" llegarán al receptor en tiempos diferentes (siempre más tarde), ya que cada una de éstas ha seguido una ruta diferente al resto. Decimos entonces que tienen un desfase con respecto a la señal primaria. Según este desfase se producirán interferencias constructivas o destructivas provocando sumas o degradaciones de la señal original. La señal vista por el receptor, que no es más que una combinación lineal de las señales multicamino con la señal primaria, sufrirá interferencias constructivas o destructivas que se traducirán en sumas o degradaciones de la señal final.

Este fenómeno se ha plasmado en las siguientes ilustraciones [24]:

Como se puede apreciar en la parte superior de la siguiente ilustración, la señal multicamino (representada en rojo) tiene un pequeño desfase con respecto a la señal primaria (representada en azul). Esto hará que cuando ambas se combinen en el receptor conformen una señal principal debilitada, tal y como hemos representado en la parte inferior.

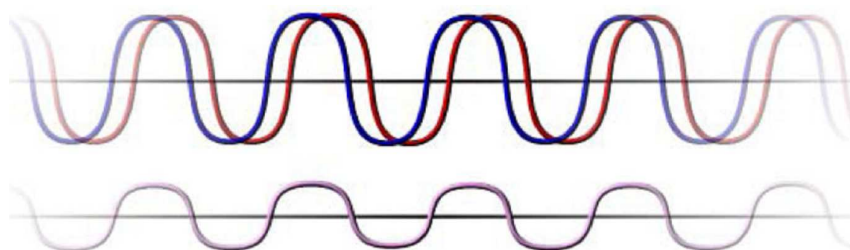


Figura 83. Señal multicamino (en rojo) y señal primaria (en azul)

Podemos encontrarnos el caso extremo: si el desfase es de 180° , la señal multicamino cancelará totalmente a la señal primaria, no teniendo señal en el receptor. Esto se muestra en la siguiente imagen

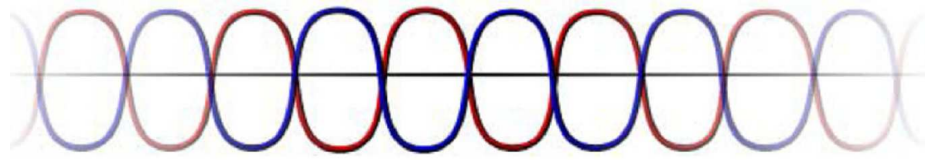


Figura 84. Señal primaria y multicamino con desfase de 180°

En la siguiente ilustración observamos un escenario típico de propagación multicamino:

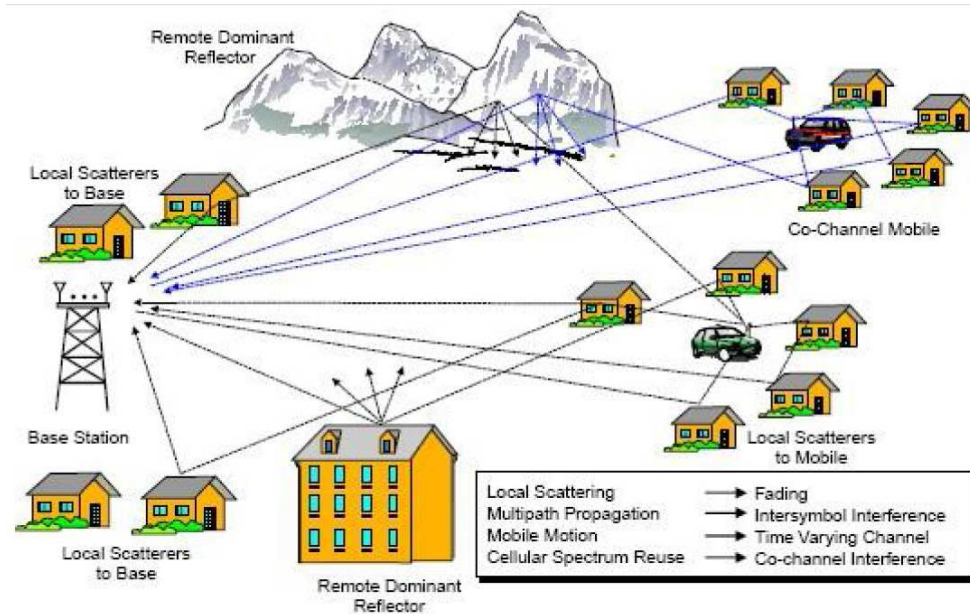


Figura 85. Escenario multicamino

A todo lo anteriormente descrito, hay que añadir otro tipo de distorsiones características del canal inalámbrico:

- ISI o Interferencia Inter-Simbólica, causada por la propagación multicamino.
- Fading o desvanecimiento de la amplitud de la señal, también causada por la propagación multitrayecto y los efectos de dispersión (*scattering*) que sufre la señal.
- CCI o Interferencia Co-Canal, causada cuando dos estaciones emiten a la misma frecuencia, en el mismo canal.
- Canal variante en el tiempo (Doppler), cuando las estaciones transmisoras y/o receptoras se encuentran en movimiento.
- Ruido térmico, inherente a los propios dispositivos electrónicos.

Todas estas distorsiones causarán una reducción importante de la velocidad de transmisión de datos y un incremento del número de errores, y los percibiremos en forma de ruidos, desvanecimientos de la amplitud, recepción intermitente o repentinas caídas de la transmisión durante nuestra comunicación.

2.8.5.2 FUNCIONAMIENTO DE MIMO

La propagación multicamino fue considerada un problema para las radiocomunicaciones, sin embargo, durante los años 90 se demostró que podía ser explotada para multiplicar la capacidad de los sistemas inalámbricos. Esta es la idea principal en la que se basa el funcionamiento de MIMO [24].

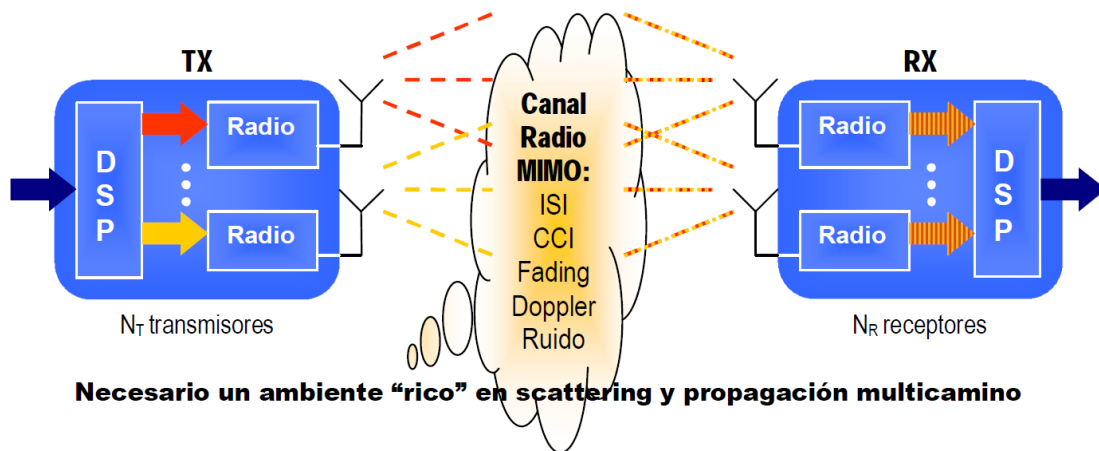


Figura 86. Funcionamiento MIMO

Un sistema MIMO dispondrá de un transmisor con N_T antenas transmisoras espacialmente distribuidas. El transmisor también contendrá un DSP (*Digital Signal Processor*, procesador digital de señales en castellano) que codificará un flujo de datos de un solo usuario con velocidad R , en N_T "subflujos" de velocidad R/N_T cada uno. Cada subflujo será modulado y enviado en paralelo hacia el canal inalámbrico por una antena diferente. Destacar que todos los subflujos se envían en el mismo intervalo de tiempo y a la misma frecuencia e, insistimos de nuevo, por antenas diferentes. En otras palabras, se enviarán múltiples señales simultáneamente por el mismo radiocanal.

MIMO saca ventaja del multicamino de la siguiente forma: cada ruta multicamino será tratada como un canal diferente, creando así una especie de "cable virtual" sobre el cual se transmite la señal. Cada ruta será un cable virtual, y el canal inalámbrico se comportará como un "mazo" de cables virtuales. Al emplear múltiples antenas separadas espacialmente, podremos aprovechar estos cables virtuales para transmitir más datos, multiplicando de esta manera el *throughput* (caudal efectivo). La tasa máxima por canal crecerá linealmente con el número de subflujos de datos diferentes que son transmitidos en el mismo canal. Además, debido a la diversidad de antenas, se incrementará también la distancia de cobertura.

Pero la transmisión sin cables no se comporta igual de bien que a través de cables, por lo que la comparación hecha no es precisa del todo. Cada señal transmitida bajo la influencia de la propagación multicamino seguirá una ruta diferente, por lo que seremos más exactos si decimos que el canal inalámbrico actuará como un conjunto de cables pero con gran grado de "fuga" entre ellos. Esto ocasionará que las señales transmitidas se mezclen juntas. Cada una de las N_R antenas del extremo receptor recibirá entonces una señal, fruto de la combinación de los múltiples subflujos transmitidos. El DSP del receptor, mediante complejos algoritmos de procesamiento de señales, separará cada uno de ellos, los ordenará y los combinará, recuperando así la señal original con los datos transmitidos originalmente.

Con un esquema de transmisión MIMO conseguimos un incremento lineal en la eficiencia espectral frente al incremento logarítmico que consiguen otros sistemas tradicionales de una sola antena. En consecuencia, la cobertura (en términos de distancia), la calidad (en términos de BER, *Bit Error Ratio*, o probabilidad de error), la capacidad (referida en Bits/Hz/segundo o número de usuarios/Hz) y la tasa de bits (Bits/segundo) se verán mejoradas notablemente

2.8.6 TIPOS DE MIMO

Podemos destacar dos tipos de MIMO: SU-MIMO (*Single-User MIMO*) y MUMIMO (*Multi-User MIMO*).

2.8.6.1 SU-MIMO (*Single-User MIMO*)

Single-User MIMO (o simplemente MIMO, sin perder generalidad) es la tecnología que hemos estado describiendo hasta ahora en el desarrollo del capítulo. Podríamos traducirlo como "MIMO de un solo usuario", o como "MIMO punto-apunto" (*Point-to-Point MIMO*) [24].

Ya hemos visto antes que este tipo de MIMO consigue grandes mejoras en la eficiencia espectral, la capacidad del canal y la fiabilidad, esencialmente mediante el uso de técnicas como la multiplexación espacial o STC. Pero SU-MIMO no explota la diversidad de usuarios, el acceso múltiple: los grados de libertad adquiridos con el uso de múltiples antenas son aprovechados para crear una transmisión multidimensional punto a punto, pero no punto a multipunto. Es decir, SU-MIMO no está diseñado para trabajar con varios usuarios al mismo tiempo. Esta es la característica diferencial con MU-MIMO.

2.8.6.2. MU-MIMO (o *Multi-User & Multi-Antenna MIMO*)

MU-MIMO es radicalmente diferente a SU-MIMO. Representa un conjunto de técnicas y algoritmos avanzados que, además de aprovechar las ventajas del uso de múltiples antenas, explota la multiplicidad de usuarios; por lo que es realmente el mecanismo empleado por LTE. Esta variación de MIMO implica el acceso múltiple, es decir, el reparto espacial del canal entre múltiples usuarios, pudiendo crear transmisiones multidimensionales punto a multipunto (un usuario a muchos usuarios), o incluso multipunto a multipunto (varios usuarios a varios usuarios). La siguiente figura trata de explicar el concepto básico de MU-MIMO [24].

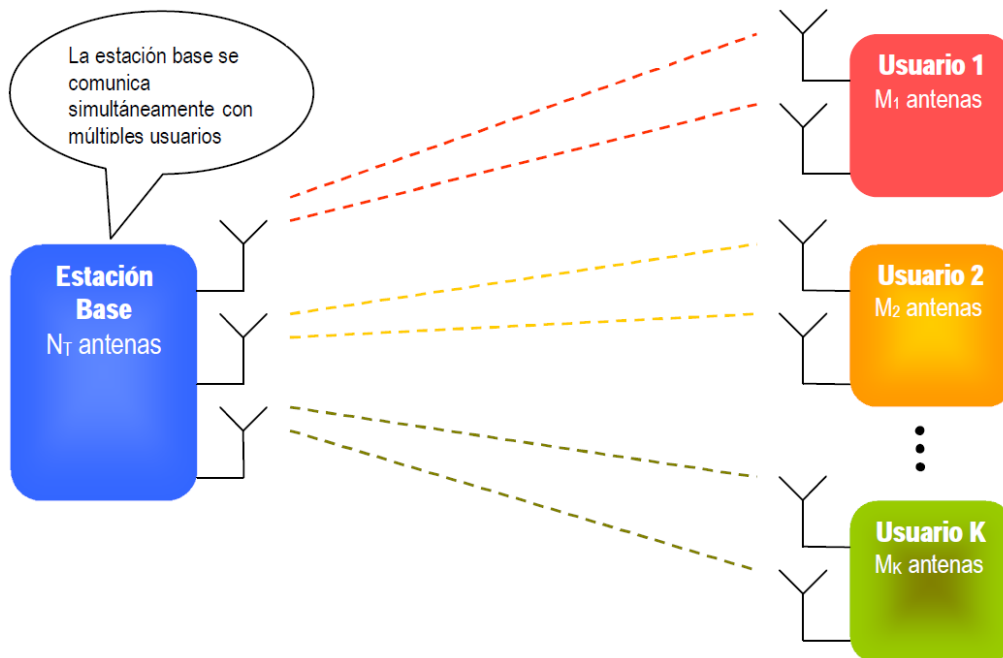


Figura 87. Concepto básico MU-MIMO

2.8.7 BREVE DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE MIMO

En este capítulo, intentaremos caracterizar matemáticamente un sistema MIMO

Podemos representar el modelo matemático de un sistema MIMO tal y como muestra la figura de abajo [24].

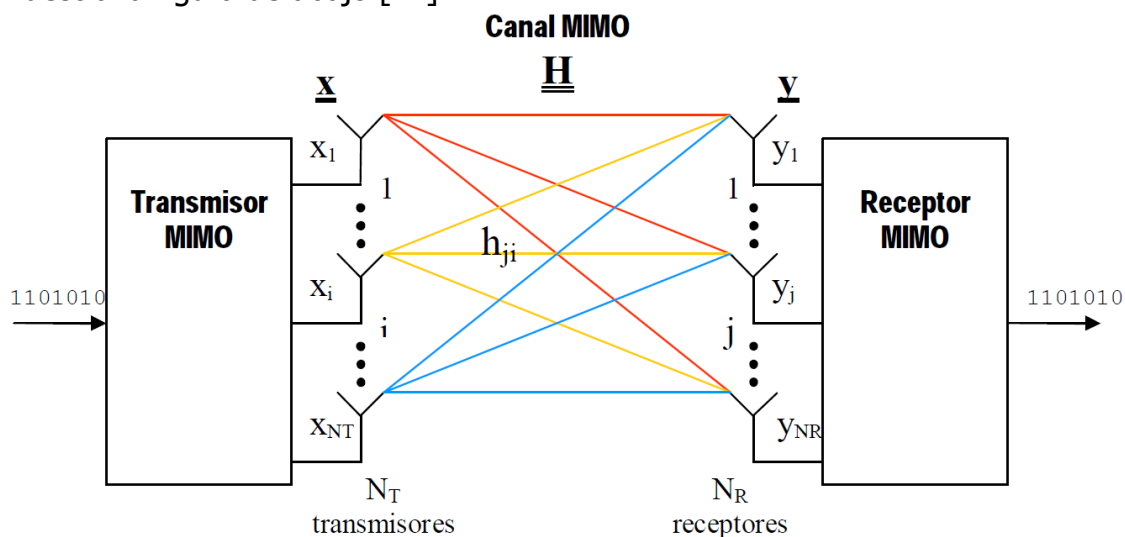


Figura 88. Canal MIMO

La relación entrada y salida en un instante de tiempo será:

$$y(t) = H x(t) + n(t)$$

donde:

- $x(t)$ es el vector de datos transmitidos, con dimensión $(N_T \times 1)$.
- $y(t)$ es el vector de datos recibidos, y tiene dimensión $(N_R \times 1)$.
- $n(t)$ es el vector de ruido AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), y es de dimensión $(N_R \times 1)$.
- H es la matriz del canal MIMO, con dimensión $(N_R \times N_T)$.

siendo N_T el número de antenas transmisoras, y N_R el número de antenas receptoras. Es decir:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_j \\ \dots \\ y_{NR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1i} & \dots & h_{1,NT} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{j1} & & h_{ji} & & h_{j,NT} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ h_{NR,1} & \dots & h_{NR,i} & \dots & h_{NR,NT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_i \\ \dots \\ x_{NT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \dots \\ n_j \\ \dots \\ n_{NR} \end{bmatrix}$$

Como vemos, una entrada general de la matriz del canal H es denotada por h_{ji} , y representa la ganancia compleja del canal desde la antena transmisora i -ésima hasta la antena receptora j -ésima:

$$h_{ji} = \alpha + j\beta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot e^{-j \cdot \arctg(\beta/\alpha)} = |h_{ji}| \cdot e^{j \cdot \phi_{ji}}$$

Por otro lado, y_j representará la señal recibida por la antena receptora j -ésima mientras que x_i será la señal transmitida por la antena emisora i -ésima. n_j será el ruido AWGN que reciba la antena receptora j -ésima.

Para el caso de un sistema SISO, donde sólo tenemos una antena transmisora ($N_T=1$) y una antena receptora ($N_R=1$), la expresión del modelo del canal cambiaría de la siguiente manera:

$$y(t) = h x(t) + n(t)$$

Definimos capacidad del canal como la tasa máxima de bits que podemos transmitir sin error a través de dicho enlace de comunicaciones. Es decir, es una medida de cuánta información puede ser transmitida y recibida con una probabilidad de error nula. La capacidad dependerá del modelo del canal, del ruido y de la potencia de la señal transmitida.

Queremos comparar la capacidad del canal SISO con la de un canal MIMO. Se puede demostrar que la capacidad del canal para un sistema SISO en un instante t , viene dada por la fórmula de Shannon:

$$C(\text{bps}) = B \log_2(1 + SNR_{SISO})$$

donde SNR es la relación señal a ruido de la señal recibida en el instante t , y que se define como.

$$SNR_{SISO} = |h|^2 \sigma_s^2 / \sigma_n^2$$

- $|h|$ es el módulo de la ganancia del canal SISO
- σ_s^2 es la varianza de la señal recibida en el receptor
- σ_n^2 es la potencia del ruido a la entrada del receptor

Para el caso MIMO, la potencia de transmisión tiene que ser adecuadamente distribuida entre todas las antenas para maximizar la capacidad. Para un caso

donde el canal es desconocido, distribuir uniformemente la potencia total del transmisor P entre las antenas disponibles puede ser una buena solución.

En este supuesto, la capacidad de un canal MIMO vendrá dada por la expresión:

$$C_{MIMO} \text{ (bps)} = B \log_2 \left(\det \left[\underline{\underline{I}} + \frac{\rho}{N_T} \underline{\underline{H}} \underline{\underline{H}}^* \right] \right)$$

Donde:

- H es la matriz ($N_R \times N_T$) del canal MIMO
- ρ es la relación señal a ruido media de la señal recibida en cada una de las antenas del receptor

Comparando ambas ecuaciones y sin entrar en mucho análisis, se desprende que:

$$\frac{C_{MIMO}}{C_{SISO}} \propto \min(N_T, N_R)$$

lo que significa que la capacidad de un canal MIMO es N_T o N_R veces mayor (el menor de los dos números) que la de un sistema SISO.

Finalmente, se pueden realizar las siguientes consideraciones [28]:

1.- Ya que el canal se modela mediante una matriz, la ingeniería MIMO consiste, en buena parte, en el procesado de matrices en tiempo real. Es por ello que en un elemento de red MIMO se necesita un transmisor diferente por cada antena transmisora y un receptor por cada antena receptora. La implementación de los sistemas MIMO encuentra su principal obstáculo en la complejidad de este procesado, sobre todo en los terminales, tanto por el tamaño de los procesadores que se requieren como por su consumo.

2.- En lo que respecta al procesado digital en los receptores, con objeto de simplificarlo se debe procurar que los elementos de la matriz H se puedan representar mediante números, no mediante funciones. Esto exige, a su vez, que la propagación entre dos antenas se pueda considerar constante en el tiempo y frecuencia. La condición relativa a considerar constante la frecuencia exige que el ancho de banda por portadora no sea excesivamente grande con respecto al retardo de propagación multitrayecto; lo que nos lleva a la conclusión de que en los sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha los sistemas MIMO son especialmente aplicables para modulaciones OFDM, en las que la velocidad de modulación por portadora es baja

2.8.8 BENEFICIOS DE MIMO

La tecnología MIMO mejora el rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico, multiplicando su eficiencia espectral. Esto se traduce en los siguientes beneficios para nuestra red o dispositivo MIMO [24]:

1.- Tasa de bits. Permitiendo la transmisión simultánea de múltiples tramas de datos, MIMO multiplica la tasa de transmisión sin consumir más espectro. El caudal efectivo o throughput incrementa en un factor igual al número de señales transmitidas en paralelo por el mismo radiocanal y al mismo tiempo

2.- Eficiencia espectral. MIMO es el único sistema que mejora la eficiencia espectral multiplicando al menos dos veces los bits transmitidos por Hz.

3.- Número de usuarios. Incrementar la capacidad permite aumentar el número de usuarios que podrían conectarse simultáneamente a nuestra red en un mismo canal de frecuencia.

4.- Cobertura. Debido a las técnicas de diversidad, alcanzaremos distancias mayores sin aumentar la potencia de transmisión. Con un solo punto de acceso podremos dar cobertura a una región de espacio más grande que antes.

5.- Fiabilidad. Aumenta. Con MIMO la probabilidad de error es más baja.

6.- Coste. Debido a que un solo punto de acceso es capaz de soportar más usuarios, y a que con la misma potencia mejoramos su alcance, necesitaremos un menor número de dispositivos, abaratando el coste de nuestra red.

2.9. CAPA FÍSICA DEL INTERFAZ AIRE

2.9.1 INTRODUCCIÓN

El gran desafío del sistema LTE como se ha visto es proporcionar una elevada velocidad de transmisión y ofrecer un servicio de calidad garantizada, merced a un incremento en la demanda por servicios de banda ancha.

El desarrollo de las tecnologías deben enfrentar dos problemas, que presentan los sistemas de comunicación inalámbricas: i) el espectro de frecuencia es un recurso escaso y limitado, ii) las condiciones de transmisión son hostiles debido al desvanecimiento provocado por el ambiente y la interferencia provocada debido a la presencia de otros usuarios. En este sentido la utilización de tecnologías que presenten eficiencia espectral y confiabilidad en la transmisión, se torna esencial.

Estos requerimientos de sistema pueden ser cumplidos por medio de la combinación de dos tecnologías para el proyecto de la capa física: OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y una estructura de comunicación MIMO (*Multi-Input and Multi-Output*), ambas estudiadas en capítulos anteriores.

2.9.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN MIMO-OFDM

En una transmisión a velocidades elevadas como es el caso de LTE, la característica multitrayecto del entorno causado por el canal MIMO presentará selectividad en frecuencia. OFDM puede transformar un canal MIMO selectivo en frecuencia, en un conjunto de canales paralelos y planos en frecuencia, lo cual reduce la complejidad del receptor. La combinación de estas dos poderosas técnicas MIMO y OFDM, es muy atractiva, por lo que se ha convertido en el

esquema más prometedor para el acceso de sistemas de comunicación inalámbrica de banda ancha [17].

2.9.2.1 MODELO DEL SISTEMA MIMO-OFDM

2.9.2.1.1 TRANSMISOR

La siguiente figura, muestra un diagrama de bloques de un transmisor MIMO-OFDM. La fuente de bits (*bitstream*) es codificada, y ésta es convertida en una constelación por medio de un modulador digital, para ser configurado con posterioridad por un codificador MIMO, donde cada salida corresponde a un flujo de símbolos, que serán modulados utilizando la técnica OFDM y posteriormente transmitidos por una antena. En el modulador OFDM, símbolos piloto son añadidos de acuerdo a un patrón, para facilitar la estimación de canal. Se añade un prefijo cíclico (CP) a cada símbolo OFDM para disminuir el retraso de difusión (*delay spread*), efecto producido por el canal, y también se añade un preámbulo a cada ranura para sincronización. Finalmente el frame de datos construido es transferido a componentes IF/RF (*Intermediate Frequency/Radio Frequency*) para su transmisión [17].

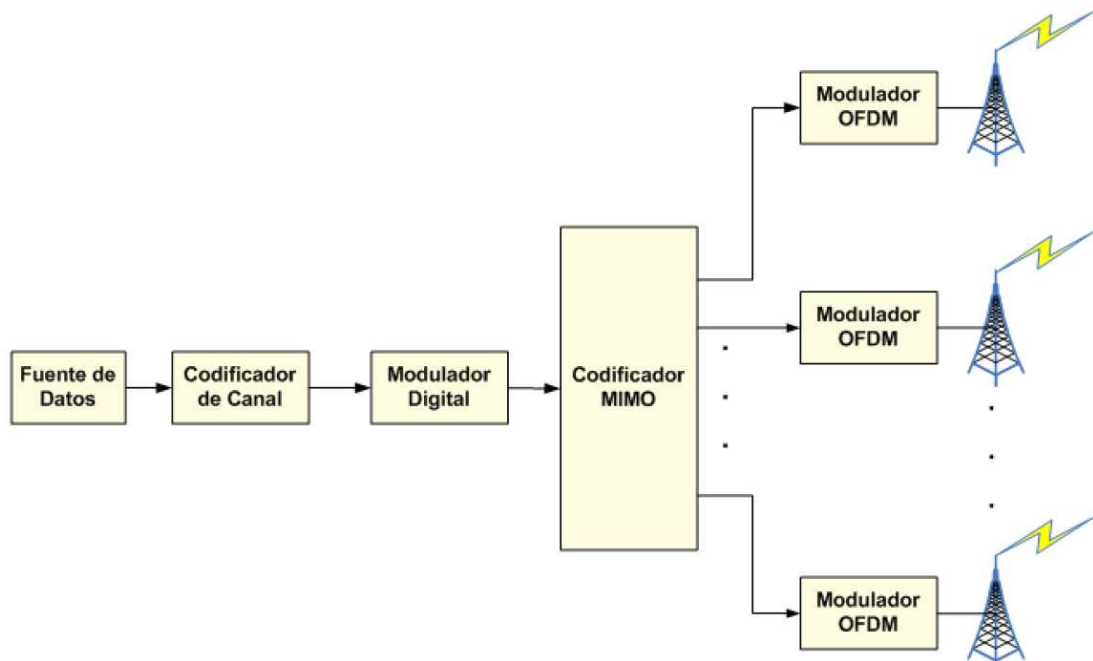


Figura 89. Esquema transmisor

2.9.2.1.2 RECEPTOR

Los símbolos recibidos en las antenas, son inicialmente sincronizadas en frecuencia y en tiempo con ayuda por el preámbulo. Después que el preámbulo y CP son extraídos del flujo de símbolos recibido, los símbolos OFDM restante son demodulados por la FFT. Frecuencias pilotos son extraídas de los símbolos OFDM demodulados en el dominio de la frecuencia. La sincronización fina de frecuencia y la sincronización de portadora son utilizadas para extraer pilotos y datos exactamente para su posterior procesamiento. Las frecuencias piloto extraídas de las señales recibidas son utilizadas, para la estimación de canal CE (*Channel Estimation*). La matriz del canal ayuda al decodificador MIMO, en la obtención de los símbolos OFDM deseados, los cuales son demodulados y decodificados. Finalmente el bitstream llega a su destino [17].

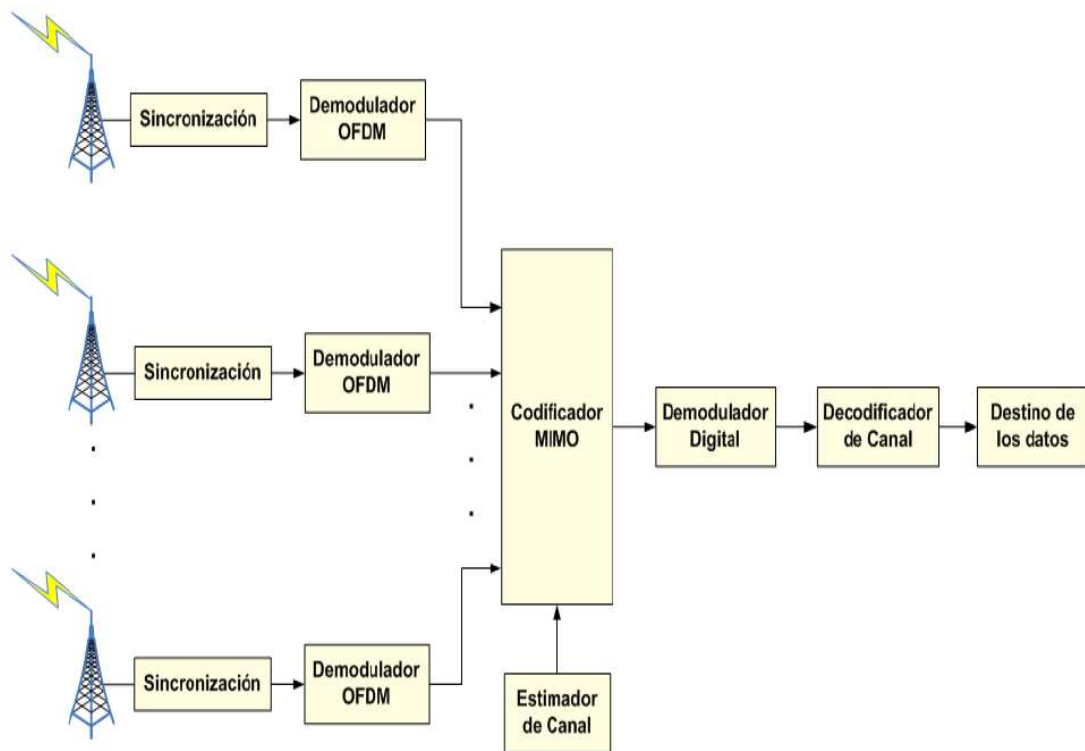


Figura 90. Esquema receptor

2.9.3 ESTRUCTURA DE TRAMA

En el dominio temporal los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos posibles estructuras de trama que se describen a continuación:

2.9.3.1 ESTRUCTURA DE TRAMA TIPO 1

Esta estructura es válida para sistemas que utilizan duplexado por división de frecuencia (FDD) y aplica tanto al enlace descendente como al ascendente. Además, la estructura soporta tanto half como full duplex FDD.

En esta estructura el eje temporal se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 20 ranuras temporales (*Slots* o TS) de duración 0,5 ms. Se define una unidad básica de recursos, formada por dos ranuras temporales (TS) denominada subtrama de duración 1 ms. Esta estructura está optimizada para coexistir con el sistema UMTS (la duración de una trama también es 10ms).

En cada ranura temporal (TS) se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM cada uno de ellos de duración $T_s = 66,7\mu s$. En el caso de utilizar 7 símbolos, el Prefijo Cíclico (CP), que a partir de ahora denominaremos prefijo cíclico normal, tiene una duración de $4,7\mu s$, salvo para el primer símbolo que tiene un prefijo cíclico de $5,2\mu s$. Si se utilizan 6 símbolos por ranura temporal entonces el prefijo cíclico, que a partir de ahora denominaremos prefijo cíclico largo, tiene una duración de $16,67\mu s$. Normalmente en celdas muy grandes se utiliza una estructura de 6 símbolos por ranura temporal ya que los retardos de propagación pueden llegar a ser de algunos μs , lo que requiere un mayor prefijo cíclico para compensar la propagación multicamino.

Para dotar de consistencia y exactitud a las definiciones de tiempo; los diferentes intervalos de tiempo dentro de las especificaciones de LTE se definen como múltiplos de una unidad básica de tiempo $T_s = 1/(15000 \cdot 2048) =$

3072000. Esta unidad básica de tiempo T_s por lo tanto puede ser vista como el tiempo de muestreo de una implementación transmisor/receptor basado en FFT un tamaño FFT igual a 2048 [13].

Los intervalos de tiempo mencionados con anterioridad, pueden por tanto expresarse como $T_{frame} = 307200 \cdot T_s$, $T_{subframe} = 30720 \cdot T_s$ y $T_{slot} = 15360 \cdot T_s$

Se anexa esquema con todo lo explicado [13]:

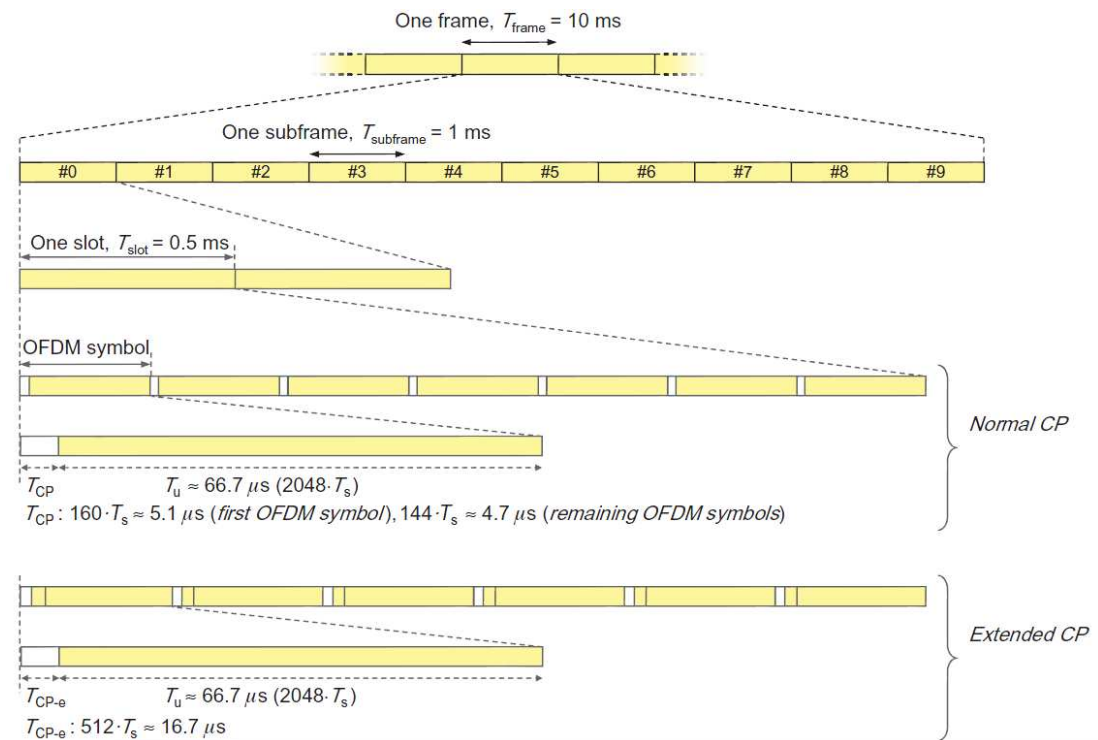


Figura 91. Trama. Intervalos de tiempo

2.9.3.2 ESTRUCTURA TRAMA TIPO 2

Esta es una estructura pensada para operar en modo TDD (Duplexado por división en tiempo). Como en el caso anterior, el eje temporal se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 10 subtramas, cada una de duración 1 ms. Es una estructura de trama mucho más flexible que la anterior en tanto que contiene subtramas de transmisión tanto para el enlace descendente (DL) como ascendente (UL) así como subtramas especiales que contienen los símbolos piloto de los enlaces ascendente y descendente y periodos de guarda entre transmisión y recepción. Esta subtrama especial aparece para facilitar la transición entre los enlaces descendente y ascendente por razones de sincronización. En efecto, aunque el sistema esté correctamente sincronizado temporalmente, por lo que respecta al enlace ascendente sus transmisiones siempre pueden sufrir de una pequeña incertidumbre temporal que obliga a mantener un mínimo tiempo de guarda.

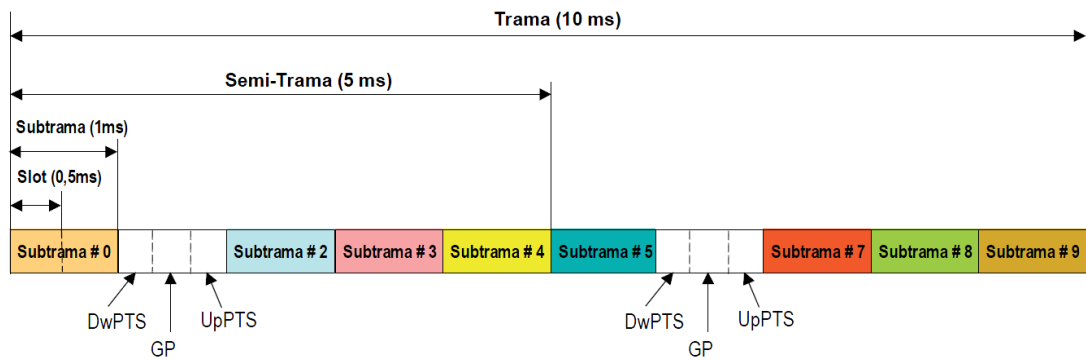


Figura 92. Trama LTE

La subtrama especial tiene una configuración variable. En ella se pueden distinguir tres campos:

- DwPTS, que corresponde a la transmisión en el enlace descendente, y cuya longitud mínima es 1 símbolo OFDM. Este primer símbolo OFDM se utiliza para ubicar la denominada señal de sincronización primaria
- UpPTS que corresponde a la transmisión en el enlace ascendente. Se utiliza para transmitir un preámbulo corto de acceso aleatorio
- GP o periodo de guarda. La longitud del mismo depende de los campos anteriores.

No profundizaremos más ya que los operadores mayoritariamente se inclinan por operar en modo FDD.

2.9.3.3 RESOURCE ELEMENT Y RESOURCE BLOCK

La capa física de la interfaz aire del sistema LTE, se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente (eNB a Móvil) y SC-FDMA en el enlace ascendente (Móvil a eNB). En ambos casos la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 KHz

Un resource element, consistente en una subportadora durante un símbolo OFDM, es el recurso físico más pequeño en LTE. Además los *resource elements* se agrupan formando *resource blocks*, donde cada uno de ellos consiste en 12 subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia y un *slot* de 0,5ms en el dominio del tiempo. Por tanto cada *resource block* consiste en $7 \times 12 = 84$ *resource elements* en el caso de un prefijo cíclico normal y $6 \times 12 = 72$ *resource elements* en caso de prefijo cíclico extendido [29].

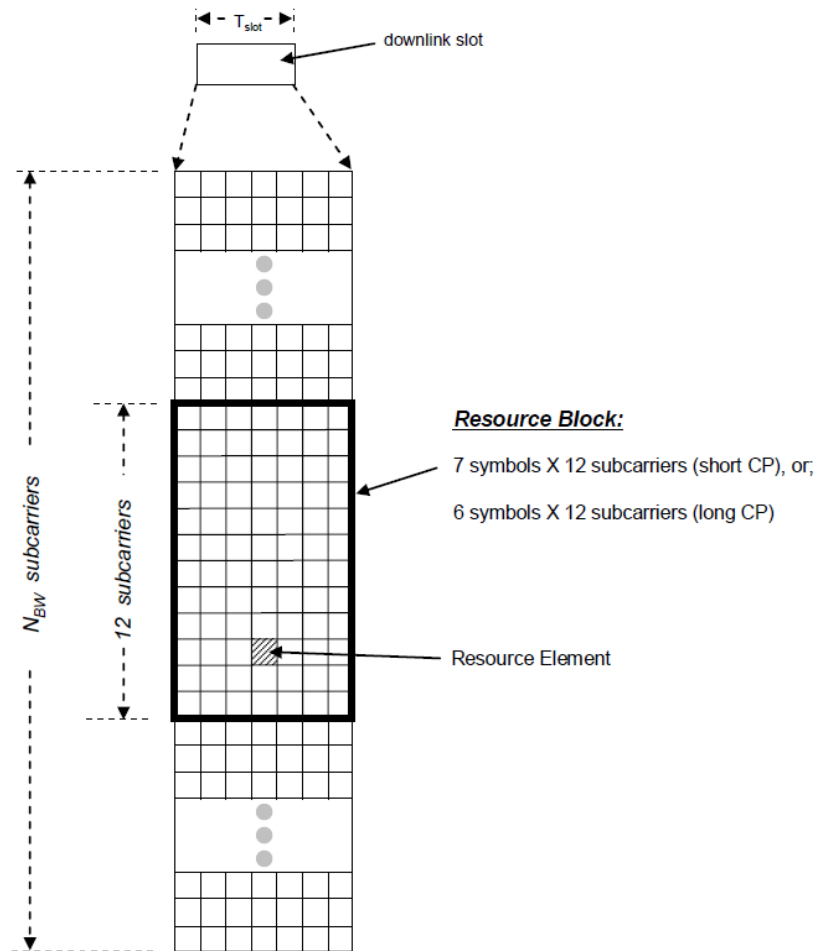


Figura 93. Resource Block

Aunque los *resource blocks* se definen sobre un *slot*, la unidad básica en el dominio del tiempo para *scheduling* dinámico es una subtrama, consistente en 2 *slots* consecutivos.

Las especificaciones de la capa física en LTE permite que la transmisión consista en un número de *resource blocks* en el dominio de la frecuencia, que van desde un mínimo de 6 hasta un máximo de 100 *resource blocks*. Esto corresponde a un ancho de banda total de transmisión que va desde alrededor de 1 MHz hasta el orden de 20 MHz con una granularidad muy fina y por tanto permite un alto grado de flexibilidad de ancho de banda en LTE, al menos desde el punto de vista de la capa física. Sin embargo, los requerimientos de LTE, al menos inicialmente, sólo especifican un conjunto limitado de anchos de banda de transmisión, correspondiéndose cada uno de ellos con un número limitado de *resource blocks*; y que se muestran en la imagen que sigue. Esto aplica tanto para el *uplink* como para el *downlink* [30].

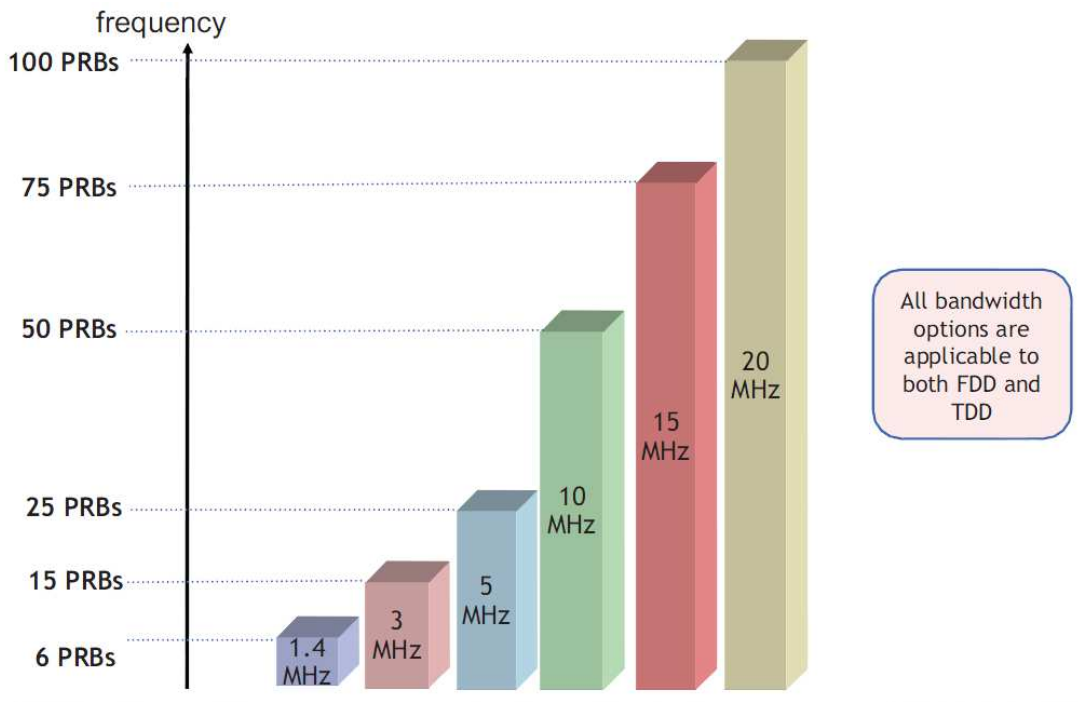


Figura 94. Conjunto de anchos de banda LTE

A continuación se muestra la relación entre la canalización, el número de *resources blocks*, número de subportadoras y demás parámetros:

Channel Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Frame Duration (ms)	10					
Subframe Duration (ms)	1					
Sub-carrier Spacing (kHz)	15					
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Occupied Sub-carriers (inc. DC sub-carrier)	73	181	301	601	901	1201
OFDM Symbols/Subframe	7/6 (short/long CP)					
CP Length (Short CP) (μ s)	5.2 (first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
CP Length (Long CP) (μ s)	16.67					

Tabla 7. Canalización, *resources blocks*, nº de portadores por bandas

Hay que tener en cuenta que el número de subportadoras es 12 veces el número de *resources block* más una, ya que hay que considerar que la subportadora central (ó subportadora DC) de la banda disponible no se utiliza para transmitir información. La subportadora DC se utiliza para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor [19].

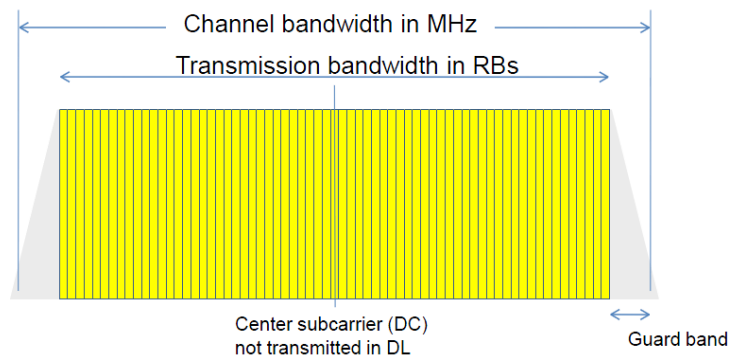


Figura 95. Subportadora central

Ya que en un *Resource Block* disponemos de 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, tenemos en total 84 recursos disponibles en

donde ubicar los símbolos QPSK, 16QAM o 64 QAM. Suponiendo que utilizamos la modulación de mayor eficiencia espectral, es decir 64 QAM que transmite 6 bits/símbolo, resulta que en un *resource block* podemos llegar a transmitir hasta 504 bits, incluyendo datos codificados de usuario, canales de control y señalización propia de la capa física del sistema, cada 0,5 ms, lo que proporciona una velocidad bruta de transmisión de pico por *resource block* de aproximadamente $R_{b,PRB}=504\text{bits}/0,5\text{ ms} \cong 1\text{ Mb/s}$.

Por consiguiente las velocidades de pico globales en la interfaz aire para las distintas canalizaciones son:

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad de Pico Total (Mb/s)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	$\cong 5,1$	$\cong 12,8$	$\cong 21$	$\cong 42,5$	$\cong 63,7$	$\cong 85$

Tabla 8. Velocidades pico en función del ancho de banda

Estas velocidades se corresponden a un sistema sin multiplexado espacial (sin MIMO). En el caso de considerar una estructura MIMO 2x2 podemos estimar grosso modo que las velocidades de pico serán el doble

2.9.4 SEÑALES FÍSICAS

Las señales físicas se asignan a *resource elements*. Sin embargo, al contrario que los canales físicos, las señales físicas no transportan información desde/hacia capas superiores. Hay 2 tipos de señales físicas:

- Señales de referencia
- Señales de señalización que transportan la información de *timing* de la red

2.9.4.1 SEÑALES DE REFERENCIA

Las señales de referencia o símbolos piloto se utilizan para:

- Obtener medidas de calidad en el enlace descendente.
- Estimar la respuesta impulsional del canal para demodulación/detección coherente.
- Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.

Las señales de referencia se sitúan en determinados recursos elementales (una subportadora y un símbolo) y mantienen una separación en el dominio de la frecuencia de seis subportadoras. Como mínimo se necesitan dos señales de referencia por PRB denominadas señales de referencia primaria (RSP). Estas señales de referencia primarias están ubicadas en el primer símbolo de una ranura temporal (TS). Si las condiciones del canal radio lo requieren puede ubicarse un segundo grupo de señales piloto o de referencia, denominadas

señales de referencia secundarios (RSS), típicamente situadas en el quinto símbolo de una ranura temporal (TS).

Veamos el caso de una única antena transmisora [30].

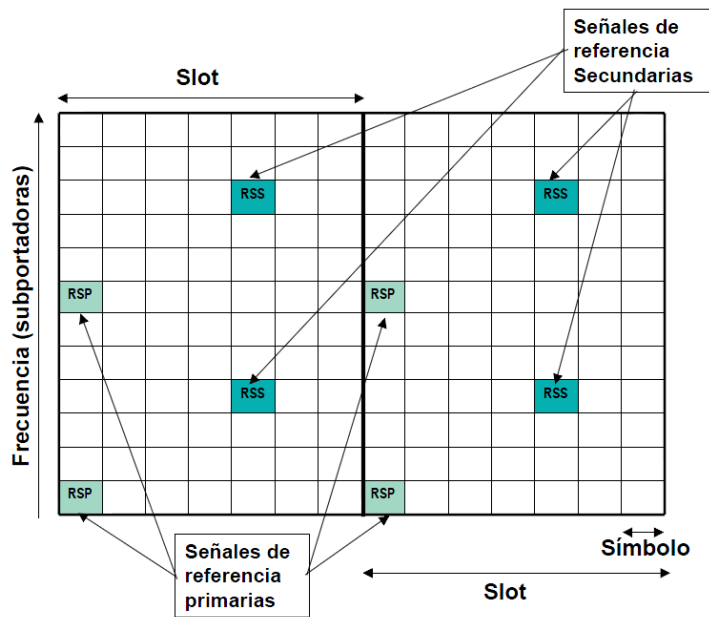


Figura 96. Señales de referencia con una sola antena transmisora

Se analiza a continuación el caso de multiplexado espacial con dos antenas. Como en el caso anterior se muestra un ejemplo con 12 subportadoras para una subtrama. Los recursos frecuencia-tiempo marcados con "X" indican que no se transmite en ellos.

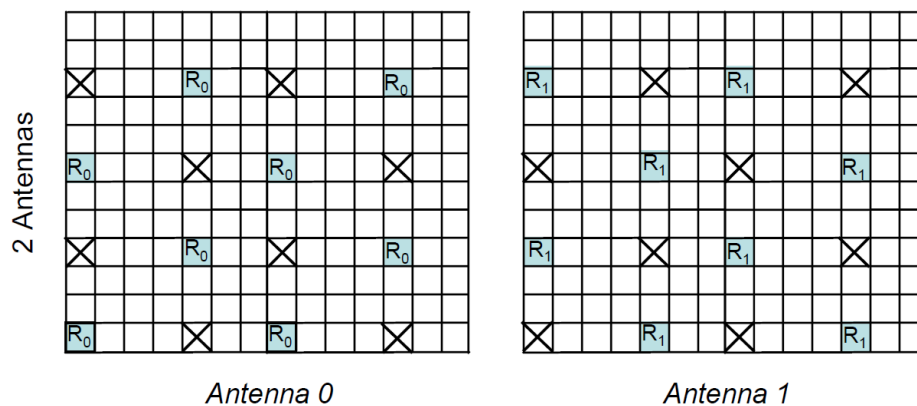


Figura 97. Señales de referencia con 2 antenas

Finalmente vemos el caso para 4 antenas:

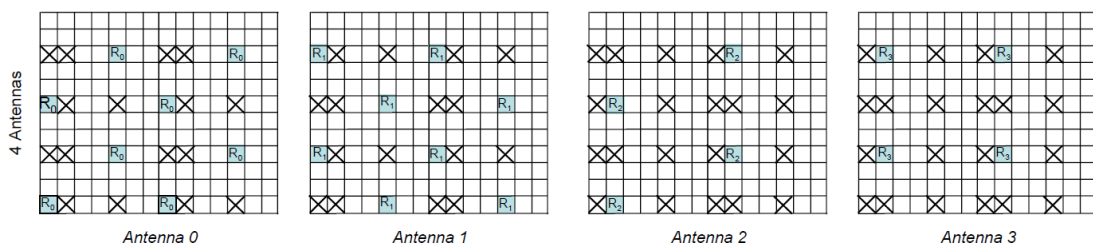


Figura 98. Señales de referencia con 4 antenas

2.9.4.2 SEÑALES DE SINCRONIZACIÓN

Las señales de sincronización usan el mismo tipo de secuencia ortogonal pseudo-aleatoria que las señales de referencia. Estas se clasifican en señales de sincronización primaria y secundaria, dependiendo de cómo son empleadas por el UE durante el proceso de búsqueda de celda. Tanto las señales de señalización primarias como secundarias son transmitidas en las 72 subportadoras en torno a la subportadora DC durante los *slots* 0 y 10 de la trama (recordemos que hay 20 *slots* en cada trama).

Capítulo 3
EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y ANTENAS
EMPLEADAS

3. El Proceso de Planificación y antenas empleadas

3.1. Introducción al proceso

El proceso de despliegue de una red abarca un gran abanico de actividades interrelacionadas en las que intervienen -en la mayoría de los casos- varios departamentos e incluso empresas.

El inicio de una red se basa en objetivos comerciales basados en un plan de negocio, una estimación de demanda, peticiones singulares y a su vez está muy influido por el presupuesto económico de partida.

Asimismo, se fundamenta en una consecución de objetivos de servicios, para lo que se diseña una red acorde empleando para ello todos los recursos necesarios.

Por tanto, en el proceso de despliegue inicial entran en actuación desde el Comité de Empresa compuesto por el Consejero Delegado, el Presidente, los Accionistas, el o los Directores Comerciales, etc., hasta los Ingenieros de Telecomunicación, Ingenieros de Construcción, Planta Externa, Agentes de la Propiedad Inmobiliaria, Empresas de obra civil (construcción de infraestructuras, soportes, mástiles, torres), Empresas de instalaciones (Equipos y cableado), Ingenierías externas, Fabricante de equipos y, en su caso, empresas proveedoras de transmisión por Fibra Óptica u otra tecnología.

Una vez implantada la red inicial, e incluso con la puesta en servicio de la primera estación base, entran en juego los Optimizadores Radio (Ingenieros de Telecomunicación), Operadores de Red, y la Supervisión y Mantenimiento.

A continuación se muestra un cuadro en el que se aprecian los distintos grupos de trabajo y actividades relacionadas:

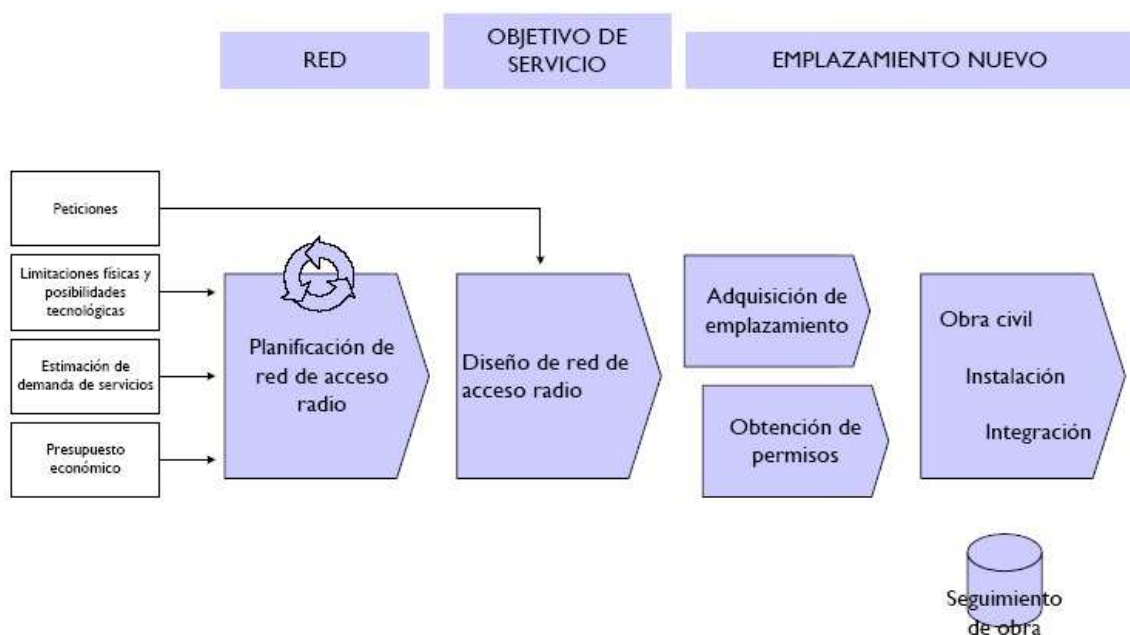


Figura 99. Grupos de trabajo y actividades relacionadas

Un nuevo Operador de Servicios de Telefonía Móvil LTE realiza el despliegue inicial en función de unos objetivos y áreas de cobertura. Lo lógico es comenzar con la dotación de cobertura en poblaciones de un tamaño mínimo y vías de comunicación principales.

En cambio, en una red madura, el proceso de despliegue se centra mayormente en problemas de capacidad, calidad, y, en poblaciones pequeñas. Dichos problemas pueden resultar la dotación de servicios y cobertura en barrios de nueva construcción, zonas con deficiencias de cobertura históricas por imposibilidad de construcción por parte del operador o cobertura de algunos interiores.

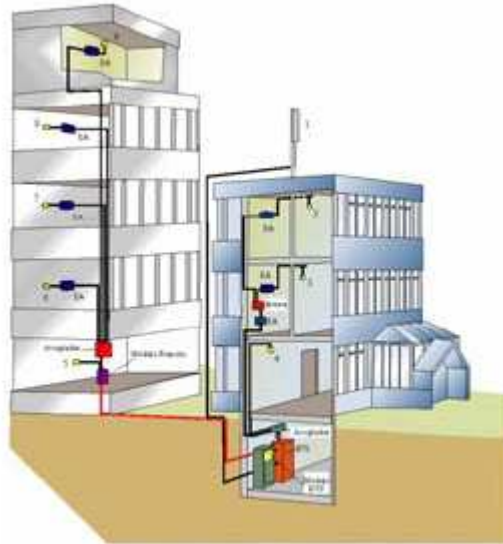


Figura 100. Instalación tipo

Las actividades en el primer despliegue se resumen en el siguiente cuadro:

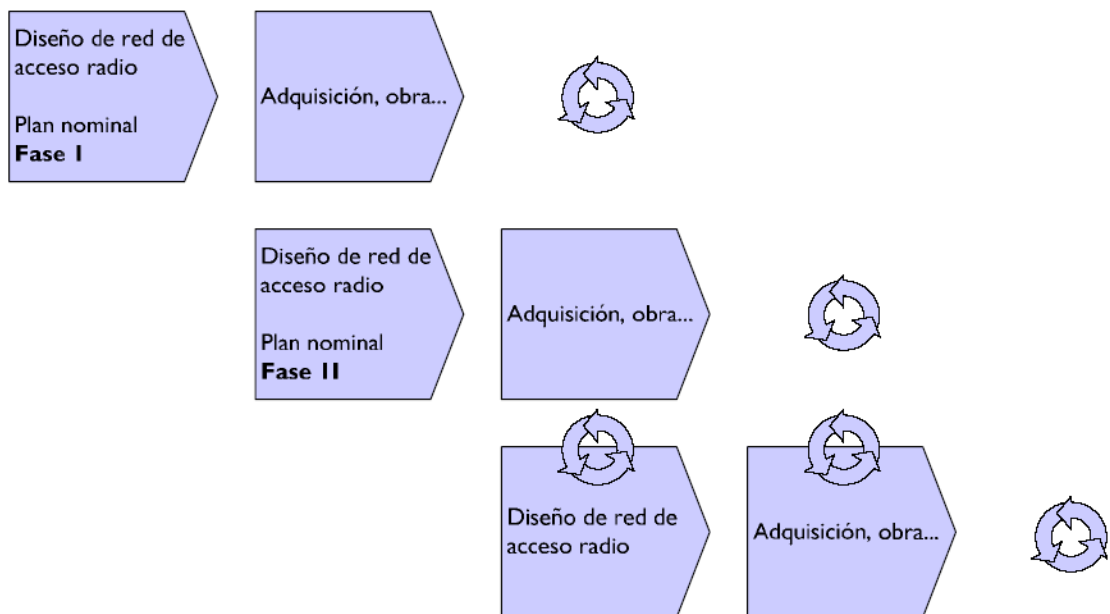


Figura 101. Actividades en la planificación

3.2. Actividades en el despliegue de red

Una vez decidido el objetivo de cobertura y las áreas poblacionales, los Ingenieros Radio LTE se centran en el diseño del Plan nominal de cada una de las ciudades o vías de comunicación.

Se detallan los pasos a seguir:

1) Estimación de coste y volumen de despliegue.

Antes de comenzar con la planificación radio de una ciudad, la dirección del proyecto recibe una estimación de coste y volumen de despliegue. Generalmente, estas unidades económicas se desarrollan de forma genérica y a nivel nacional o regional, en función de si el operador es de carácter regional o nacional.

2) Preparación de suministros e instalaciones.

Con la estimación del número de emplazamientos a contratar para la puesta en servicio de Estaciones Base, se realiza un pedido de equipos a los diferentes proveedores de equipamiento y se crea un plan de actuación con fechas de ejecución previstas para las distintas empresas que intervienen.

3) Elaboración del Plan nominal.

Planificación radio y la dirección del proyecto acuerdan un plan nominal. Los planificadores radio visitan y documentan las áreas objetivo de cobertura e identifican los emplazamientos candidatos.



Figura 102. Fotografía con 2 candidatos

Asimismo, se realiza una priorización de los candidatos.



Figura 103. Priorización de candidatos

4) Encargo de prospección.

Planificación Radio pasa a Prospección (Departamento de Ubicaciones) una lista de direcciones postales y datos de contacto de todos los emplazamientos candidatos.



Figura 104. Encargo de la prospección

5) Prospección encarga grupos de emplazamientos candidatos a empresas de agentes de la propiedad inmobiliaria para su posterior contratación.

6) Cada Agente cumplimenta un cuestionario acerca de las características principales de sus emplazamientos candidatos.

En emplazamientos urbanos:

- Posibilidad de instalación de equipos sin emplear grúa (dimensiones de las puertas de paso, incluso ascensor).

- Instalación eléctrica con calibre suficiente.
- Existencia de espacio mediante una habilitación, cabida de una caseta modular, o equipos de exterior.
- Tipo de cubierta. Azotea con o sin pretil. Existencia de tejado y castilletes.

7) Contratación.

En función de las prioridades se contratan los emplazamientos candidatos previa comunicación al planificador.

Prospección asigna gratificaciones decrecientes, que dependen del coste de la instalación o del tiempo empleado para su contratación.

8) Replanteo de obra.

Generación de proyecto constructivo.

El replanteo de obra acaba con un acta con dos vertientes diferenciadas, que son:

- Configuración Radio: la describe y completa el Planificador Radio y la recibe el correspondiente Instalador Radio asignado.
- Descripción de Obra Civil: la describe y completa el Aparejador o Ingeniero recibíendola el constructor asignado.

El constructor recibe el acta de replanteo para poder la obra con la mayor celeridad posible. Además, remite una copia al instalador radio y el original al gestor de la base de datos.

El gestor de la base de datos, en ocasiones puede coincidir con el responsable del constructor, transcribe el contenido del acta de replanteo.

9) Solicitud de licencia.

Trámites de licencia de obra y generación de proyecto radioeléctrico. Dependiendo del municipio será requerido o no un plan técnico especial con previsión de instalación a corte, medio y largo plazo. Este plan tiene que satisfacer la ordenanza municipal reguladora, en la que se detalla toda la documentación solicitada.

10) Inicio de las obras.

Una vez concedidas las pertinentes licencias se procede con la instalación cumpliendo unas fechas especificadas por la dirección del proyecto. Para conseguir los objetivos en cuanto a plazos se reparte de forma adecuada la carga de trabajo.

11) Puesta en servicio.

La persona encargada de la puesta en servicio de la Estación Base, junto con toda la documentación necesaria, como pueden ser la base de datos del Nodo a cargar, la dirección, zona objetivo de cobertura, servicios ofrecidos, etc... se encargará del correcto funcionamiento de la estación base comprobando exhaustivamente los niveles de señal, realiza pruebas de

llamadas, descarga de datos, transferencia de ficheros, medidas de cobertura mediante maleta específica, comprobación de las alarmas del emplazamiento, y, en definitiva la aceptación parcial del emplazamiento y del Nodo.

Estos datos serán remitidos al planificador radio para su posterior aceptación total.

A partir de aquí, el planificador decide si se precisan o no de Nodos intermedios no contemplados en la fase inicial y los incluye en el seguimiento de la Fase II.

En las fases sucesivas se solucionan problemas de cobertura y se ofrecen mejores servicios a puntos singulares (edificios, centros comerciales, etc.). Más adelante, cuando las estaciones base estén al máximo de su capacidad por el espectro disponible, se densificarán emplazamientos.

En estas fases se podrá determinar la instalación de varios tipos de estaciones o celdas como pueden ser las de tipo macrocelular (son las que preferentemente se instalan en la Fase I), microcelular o picocelular.

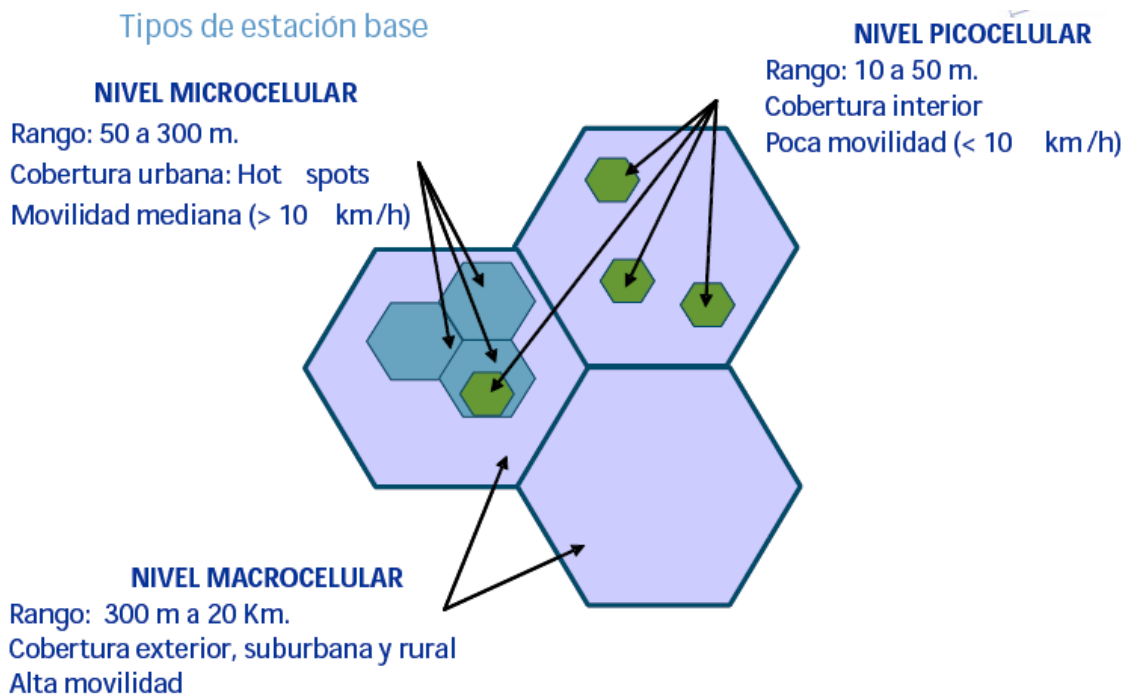


Figura 105. Tipo de estaciones base

En definitiva, el proceso de despliegue está condicionado por intereses diferentes de los participantes: Planificación, diseño, adquisición, suministro de equipos, obra, instalación, etc...

El valor de los emplazamientos está en extender y limitar su objetivo de cobertura. El despliegue evoluciona, por tanto, para aumentar su capacidad multiplicándose su complejidad y sus opciones tecnológicas.

Los sistemas radio actuales se acercan a eficiencia óptima, adoptando un compromiso entre capacidad y cobertura. Esto hace que el área de cobertura no sea uniforme, lo que dificulta el estudio del valor de los emplazamientos.

3.3. Antenas empleadas

A continuación se presentan distintos tipos de antenas que normalmente se instalan en los actuales despliegues redes de Telefonía Móvil.

Podemos dividir el gran abanico de posibilidades en las siguientes categorías:

- Antenas colineales: Antenas con diagrama de radiación omnidireccional de bajo impacto visual y con baja-media ganancia. Se emplea en entornos rurales o zonas con baja población de piloto. Normalmente se evita su utilización, ya que el área de cobertura es reducido.
- Antenas monobanda: son las antenas empleadas en zonas de poca densidad de población donde normalmente no son tan rentables las estaciones base por su bajo tráfico.

Asimismo, también se suelen instalar cuando existen problemas de espacio, cuando es preciso por una ampliación en un emplazamiento existente, cuando se comparte infraestructura o incluso cuando existen problemas estructurales.

- Antenas duales: típicamente disponen de 2 arrays de antenas. De dimensiones reducidas se pueden usar en instalaciones donde es un factor importante y en situaciones parecidas a las antenas monobanda.
- Antenas tribanda: se caracterizan por influir banda baja y alta en sus arrays, por lo que son ideales para operadores que desplieguen en bandes de frecuencias bajas y altas.
- Antenas compartición: como caso particular a las antenas tribanda, existen antenas con más de 4 arrays y que suelen utilizarse en nuevas instalaciones en áreas urbanas, sobre todo, aunque cada vez es más frecuente su instalación en áreas periféricas de zonas urbanas o incluso en entornos rurales.
- Antenas trisector: son normalmente antenas tribanda con al menos 2 arrays de antenas por sector que disponen de 3 antenas integradas en un cuerpo cilíndrico que puede simular una chimenea o salida de aire de edificaciones.
- Antenas especiales: en lugares donde la demanda de tráfico es muy elevada, se suelen usar antenas con haces estrechos que focalizan el área de cobertura de un sector aumentando así la capacidad. Existen antenas bilobulares y pentabanda muy utilizadas en eventos deportivos, fiestas, ferias, etc...
- Antenas microcelulares: como su nombre indica son antenas que se emplean en despliegues de red microcelulares. Por su pequeño tamaño y características técnicas suelen tener una baja ganancia, y se instalan en entornos de alto tráfico *Hot Spots*, reclamaciones de cobertura, etc...

En las próximas páginas se muestran varios modelos de antenas utilizados en la actualidad que se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de antena	Banda de frecuencia	Número de arrays	Modelo
Colineales	Low Band	1 conector LB	Moyano MY-1613
	Low band (con Dividendo Digital)	1 conector LB	Kathrein 80010747
	High Band	1 conector HB	Amphenol W360-17-x
	Dual (Low Band – High Band)	1 conector LB 1 conector HB	Kathrein 80010274
Paneles Monobanda	High Band	2xHB	Kathrein 80010622
	Low Band 90° (con Dividendo Digital)		Kathrein 80010817
	Low Band 65° (con Dividendo Digital)	2xLB	Commscope LDXX-6516DS-VTM
	Low Band 65° (con Dividendo Digital)	4xLB	Telnet TNA190A14
Multibanda	Low Band + High Band	1LB+2HB	Commscope CVVPX310R1
	Low Band + High Band	1LB+3HB	Huawei AQU4518R9
	Low Band + High Band	2LB+2HB	Huawei AQU4518R18
	Low Band + High Band	2LB+4HB	Jaybeam 5980300G
Trisector	Low Band + High Band	1LB+2HB	Moyano MY-Rocket-A306-DL-650
	Low Band + High Band	2LB+4HB	Telnet TNA690A10
Especiales	Haz estrecho 33°	1HB	HBX-3319DS-VTM
	Bilobular de haz estrecho	2xHB	Kathrein 80010606v01
Microcelulares	Omnidireccional	Tribanda	Kathrein 80010249
	Panel directivo	Tribanda	Kathrein 80010465
	Omnidireccional MIMO		Commscope CMAX-OMH-CPUSEi

Tabla 9. Tipos de antenas

Leyenda: LB → Low Band; HB → High Band; DD → Dividendo Digital;

A continuación se muestran las características técnicas de los modelos de antena de la tabla [31-36] con los parámetros radioeléctricos habituales tales como ganancia, ancho de haz, intermodulación. Los elementos básicos de la agrupación de antenas suelen ser parches [50-55] y dipolos.

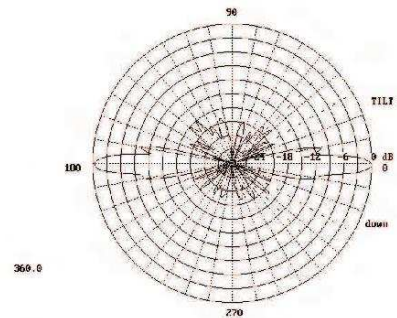
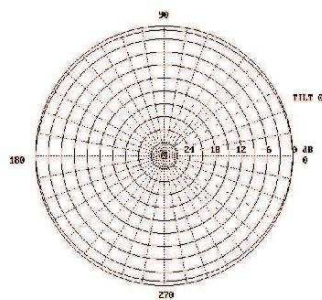
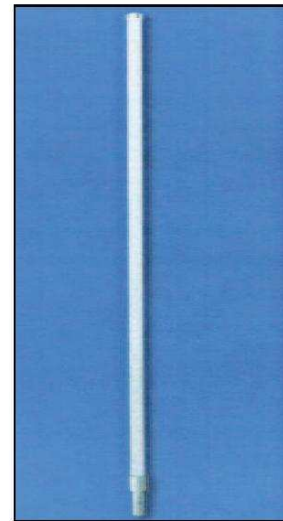
Antenas colineales:

**BASE STATION ANTENNAS GSM 900 MHz
VERTICAL POLARIZATION**

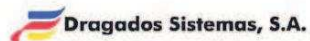


**OMNIDIRECTIONAL
COLINEAR ANTENNA**

TECHNICAL PERFORMANCE	MY-1613-0 MY-1613-3 MY-1613-6		
	• Frequency Band	870 ÷ 960 MHz	
• Gain	11 dBi		
• VSWR	< 1.5 ÷ 1		
• H Beamwidth	Omnidirectional		
• V Beamwidth	< 7°		
• Polarization	Vertical		
• Power Handling	500 W		
• Electrical Tilt	0° 1613-0	3° 1613-3	6° 1613-6°
• Connector	DIN 7/16 (F)		
• Intermodulation	2 x 10 w < 110 dBm		
• Lightning Protection	DC Grounded		
• Length	3300 mm		
• Diameter	50 mm Ø		
• Weight	7 Kg		
• Bracket Size	To suit pole mounting 60 mm Ø		
• Radome material	Grey Glass Fiber		
• Wind Load	25 Kg @ 160Km/h		



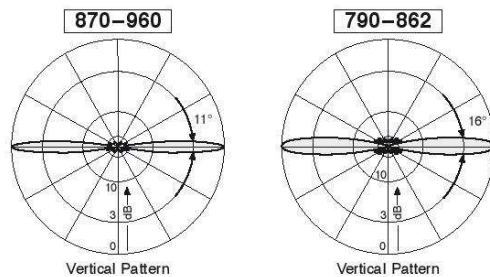
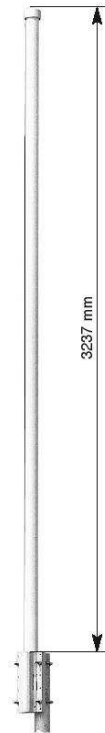
SISTEMAS RADIANTES F. MOYANO S.A reserves the right to vary the description and specification in this publication



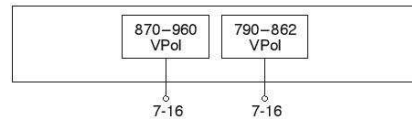
SISTEMAS RADIANTES, F. MOYANO, S.A
C/ La Granja, 72 Zona Industrial
28108 Alcobendas, MADRID. (SPAIN)
Tel. +34-91-6610750 Fax. +34-91-6615447
www.moyano.com

VVPol Omni 870-960/790-862 360°/360° 9/8dBi

Type No.	80010747	
Frequency range	Top system 870 – 960 MHz	Bottom system 790 – 862 MHz
Polarization	Vertical	Vertical
Gain	9 dBi	8 dBi
Half-power beam width	Horizontal: Omni Vertical: 11°	Horizontal: Omni Vertical: 16°
Isolation, between ports	> 30 dB	
Impedance	50 Ω	
VSWR	< 1.5	< 1.5
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)	
Max. power per input	150 W	100 W (at 50 °C ambient temperature)



936 3951 Subject to alteration.



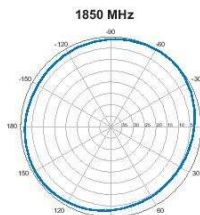
Mechanical specifications	
Input	2 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Weight	8 kg
Wind load	230 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	180 km/h
Packing size	3516 x 148 x 112 mm
Height	3237 mm
Radome diameter	51 mm

W360-17-x

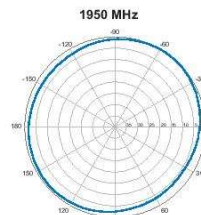
V-Pol | Omnidirectional | 11.8 dBi

Replace 'x' with electrical downtilt.

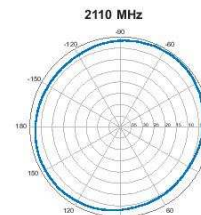
Electrical Characteristics	
Frequency bands	1710-2170 MHz
Polarisation	Vertical
Horizontal beamwidth (-3 dB)	Omnidirectional (±3 dB typically)
Vertical beamwidth (-3 dB)	5° typically
Gain	9.7 dBd / 11.8 dBi
Electrical downtilt (x)	0°, 2°, 5°, 6°
Input impedance	50Ω
VSWR	<1.5:1
IM3 (2x20W carrier)	<-153 dBc
Input power at 40° C	250 W
Connector	7/16-DIN Female
Lightning protection	Direct ground: lightning finial at upper end
Operating temperature	-40° to +60° C -40° to +140° F
Mechanical Characteristics	
Radiating element material	Copper
Radiating element housing	UV-stabilised pigmented fibreglass
Humidity	up to 100% condensing
Dimensions (Height x Diameter)	
Radome:	1768 x 70 mm 70.0 x 2.7 in
Mounting fixture:	400 x 80 mm 16.0 x 3.1 in
Weight without brackets	8.0 kg 17.6 lbs
Survival wind speed	200 km/hr 125 mph
Wind load @ 160 km/hr (100 mph)	180 N 40 lbf
Mounting Options	
Mounting bracket	0900638/00
Alternate mounting bracket	0300235/00



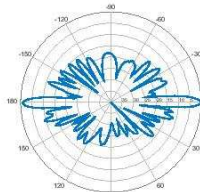
Horizontal | 1850 MHz



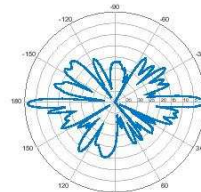
Horizontal | 1950 MHz



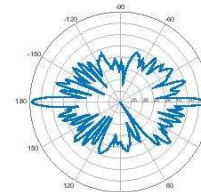
Horizontal | 2110 MHz



0° | Vertical | 1850 MHz



0° | Vertical | 1950 MHz



0° | Vertical | 2110 MHz

Quoted performance parameters are provided to offer typical or range values only and may vary as a result of normal manufacturing and operational conditions. Extreme operational conditions and/or stress on structural supports is beyond our control. Such conditions may result in damage to this product. Improvements to product may be made without notice.

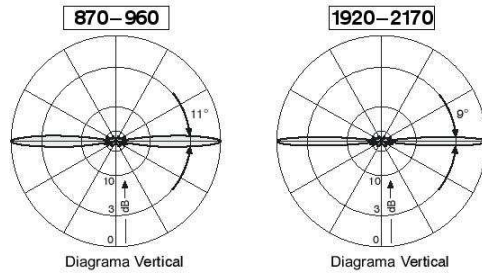
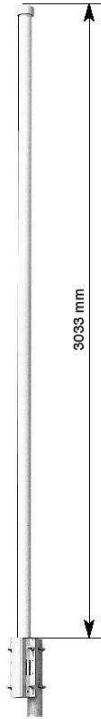
Antena Omnidireccional Banda Doble **870-960** **1920-2170**
Polarización Vertical

V **V**

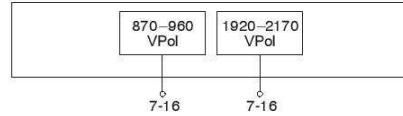
KATHREIN
MOBILCOM BRASIL

WVPol Omni 870-960/1920-2170 360°/360° 9/10dBi

Modelo	800 10274	
Rango de Frecuencia	Sistema Superior 870 – 960 MHz	Sistema Inferior 1920 – 2170 MHz
Polarización	Vertical	Vertical
Ganancia	9 dBi	10 dBi
Ancho del haz de media potencia	Horizontal: Omni Vertical: 11°	Horizontal: Omni Vertical: 9°
Aislamiento entre puertas	> 30 dB	
Impedancia	50 Ω	
ROE	< 1.5	< 1.5
Intermodulación IM3 (2 x 43 dBm portadoras)	< -150 dBc	
Potencia máxima de entrada	150 W (50 °C de temperatura ambiente)	100 W (50 °C de temperatura ambiente)



1053080312



Características mecánicas	
Entrada	2 x 7-16 hembra
Posición del conector	Inferior
Peso	8 kg
Carga del viento	210 N (a 150 km/h)
Vel. máx. viento	
Dim. embalaje	3380 mm x 148 mm x 112 mm
Altura	3033 mm
Dia. del Radomo	51 mm

Sujeto a alteración sin aviso previo

800 10274 Pag. 1 / 2

KATHREIN MOBILCOM BRASIL - Fone: 55 11 5685-4290 - FAX: 55 11 5685-4292
 e-mail: americas@kathrein.com.br

Antenas monobanda:

Multi-band Panel

Dual Polarization

Half-power Beam Width

Adjust. Electrical Downtilt

Enhanced Sidelobe Suppression

1710-2690	1710-2690
-----------	-----------

X	X
---	---

65°	65°
-----	-----

0°-12°	0°-12°
--------	--------

18dB	18dB
------	------

KATHREIN

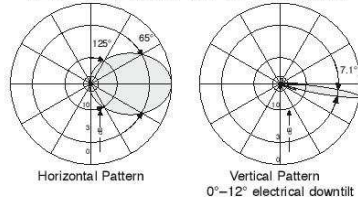
Antennen · Electronic

Downtilt set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

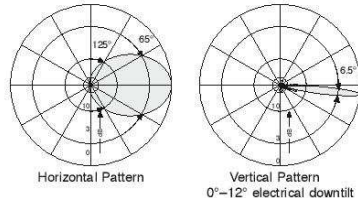
XXPol Panel 1710-2690/1710-2690 65°/65° 18/18dB 0°-12°/0°-12°T ESLS

Type No.	80010622			
Frequency range	1710 - 1990 MHz	1920 - 2200 MHz	1710-2690 2200 - 2490 MHz	
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°	
Gain (dBi)	17.4 ... 17.4 ... 17.3	17.8 ... 17.6 ... 17.5	18.0 ... 17.9 ... 17.5	
Tilt	0° ... 6° ... 12°	0° ... 6° ... 12°	0° ... 6° ... 12°	
Horizontal Pattern:				
Half-power beam width	65°	65°	61°	61°
Front-to-back ratio (180° ±30°)	> 25 dB, avg. 28 dB	> 26 dB, avg. 28 dB	> 25 dB, avg. 27 dB	
Cross polar ratio	0°	Typically: 30 dB	Typically: 25 dB	
Sector	±60°	> 10 dB	> 8 dB	
Vertical Pattern:				
Half-power beam width	7.1°	6.5°	5.9°	5.7°
Electrical tilt	0°-12°, continuously adjustable			
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	0° ... 6° ... 12° T ≥ 18 ... 18 ... 18 dB	0° ... 6° ... 12° T ≥ 18 ... 18 ... 18 dB	0° ... 6° ... 12° T ≥ 18 ... 17 ... 17 dB	
Impedance	50 Ω			
VSWR	< 1.5			
Isolation, between ports	> 30 dB			
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)			
Max. power per input	300 W (at 50 °C ambient temperature)			

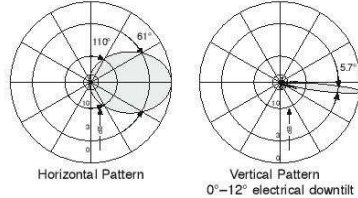
1710 - 1990 MHz: +45°/-45° Polarization



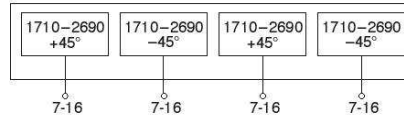
1920 - 2200 MHz: +45°/-45° Polarization



2490 - 2690 MHz: +45°/-45° Polarization



936.3621/a Subject to alteration.



Mechanical specifications

Input	4 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Adjustment mechanism	2x, Position bottom continuously adjustable
Wind load	Frontal: 720 N (at 150 km/h) Lateral: 165 N (at 150 km/h) Rearside: 740 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Height/width/depth	1415 / 323 / 71 mm
Category of mounting hardware	M (Medium)
Weight	17.5 kg / 19.5 kg (clamps incl.)
Packing size	1706 x 337 x 112 mm
Scope of supply	Panel and 2 units of clamps for 50 - 115 mm diameter



Internet: www.kathrein.de

80010622 Page 1 of 5

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Straße 1 - 3 · P.O. Box 10 04 44 · 83004 Rosenheim · Germany · Phone +49 8031 184-0 · Fax +49 8031 184-973

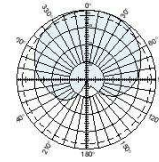
- X-polarized (+45° and -45°).
- UV resistant fiberglass radomes.
- Wideband vector dipole technology.
- DC Grounded metallic parts for impulse suppression.

General specifications:

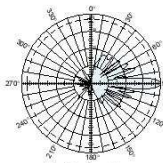
Frequency range	790-960 MHz
VSWR	<1.5:1
Impedance	50 ohms
Intermodulation (2x20w)	IM3: <-150 dBc
Polarization	+45° and -45°
Maximum input power	400 watts per input (at 50°C)
Connector	4 x 7-16 DIN female
Isolation	intrasystem >27 dB intersystem >27 dB
Weight	52.9 lb (24 kg) 57.3 lb (26 kg) clamps included
Dimensions	103.6 x 14.7 x 4.2 inches (2631 x 374 x 106 mm)
Wind load	at 93 mph (150kph)
Front/Side/Rear	286 lbf / 90 lbf / 385 lbf (1270 N) / (400 N) / (1710 N)
Mounting category	H (Heavy)
Wind survival rating*	120 mph (200 kph)
Shipping dimensions	120.3 x 15.3 x 5.2 inches (3055 x 388 x 133 mm)
Mounting	Fixed mounts for 2 to 4.6 inch (50 to 115 mm) OD masts are included and tilt options are available.

See reverse for order information.

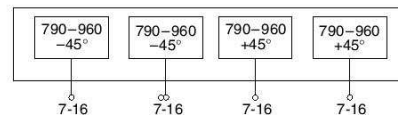
* Mechanical design is based on environmental conditions as stipulated in TIA-222-G-2 (December 2009) and/or ETS 300 019-1-4 which include the static mechanical load imposed on an antenna by wind at maximum velocity. See the Engineering Section of the catalog for further details.



Horizontal pattern
±45°-polarization



Vertical pattern
±45°-polarization
0°-8° electrical downtilt



Specifications:	790-862 MHz			824-894 MHz			880-960 MHz			
Average gain	tilt	0°	4°	8°	0°	4°	8°	0°	4°	8°
	dBi	15.4	15.4	15	15.7	15.7	15.4	16	16.1	15.9
Front-to-back ratio (180° ±0°)		>24 dB			>24 dB			>25 dB		
	(180° ±30)	>20 dB			>21 dB			>22 dB		
Horizontal beamwidth		93° (half-power)			90° (half-power)			87° (half-power)		
Vertical beamwidth		7.4° (half-power)			7.2° (half-power)			6.9° (half-power)		
Electrical downtilt		0°-8°			0°-8°			0°-8°		
	continuously adjustable	(manual or optional remote control)			(manual or optional remote control)			(manual or optional remote control)		
Sidelobe suppression for:		0°	4°	8° T	0°	4°	8° T	0°	4°	8° T
First sidelobe above main beam		≥17	17	15 dB	≥17	17	15 dB	≥17	17	15 dB
Cross polar ratio		20 dB (typical)			20 dB (typical)			18 dB (typical)		
Main direction	0°	>10 dB			>10 dB			>10 dB		
Sector	±60°	>10 dB			>10 dB			>10 dB		



11321-A
936.4322



Kathrein Inc., Scala Division Post Office Box 4580 Medford, OR 97501 (USA) Phone: (541) 779-6500 Fax: (541) 779-3991
Email: communications@kathrein.com Internet: www.kathrein-scala.com



LDXX-6516DS-VTM

Andrew® Quad Port Teletilt® Antenna, 790–960 MHz, 65° horizontal beamwidth, RET compatible

- Engineered to provide wideband capability to support “Digital Dividend” band applications, future ready
- Same physical size as existing 800/900 MHz antennas for easy site zoning
- Proven core design technology, with over 1,000,000 similar antennas deployed

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	790–862	824–894	870–960
Gain, dBi	17.5	17.9	17.5
Beamwidth, Horizontal, degrees	70	67	64
Beamwidth, Vertical, degrees	7.9	7.5	7.1
Beam Tilt, degrees	0–8	0–8	0–8
USLS, dB	17	17	17
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	30	30	30
CPR at Boresight, dB	24	24	25
CPR at Sector, dB	16	16	12
Isolation, dB	30	30	30
Isolation, Cross Polarization, port to port, dB	30	30	30
VSWR Return Loss, dB	1.4 15.6	1.4 15.6	1.4 15.6
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-150	-150	-150
Input Power per Port, maximum, watts	350	350	350
Polarization	±45°	±45°	±45°
Impedance	50 ohm	50 ohm	50 ohm

Electrical Specifications, BASTA*

Frequency Band, MHz	790–862	824–894	870–960
Gain by all Beam Tilts, average, dBi	16.8	17.1	17.3
Gain by all Beam Tilts Tolerance, dB	±0.5	±0.2	±0.4
	0° 16.7	0° 17.0	0° 17.2
Gain by Beam Tilt, average, dBi	4° 16.8	4° 17.2	4° 17.3
	8° 16.7	8° 17.1	8° 17.3
Beamwidth, Horizontal Tolerance, degrees	±3.5	±3.1	±4
Beamwidth, Vertical Tolerance, degrees	±0.4	±0.4	±0.3
USLS, dB	17	17	17
Front-to-Back Total Power at 180° ± 30°, dB	26	26	24
CPR at Boresight, dB	24	24	25
CPR at Sector, dB	16	16	12

* CommScope® supports NGMN recommendations on Base Station Antenna Standards (BASTA). To learn more about the benefits of BASTA, [download the whitepaper Time to Raise the Bar on BSAs.](#)

General Specifications

Antenna Brand	Andrew®
Antenna Type	DualPol® quad
Band	Single band
Brand	DualPol® Teletilt®
Operating Frequency Band	790 – 960 MHz

Single-band (790-960MHz) Panel Antenna

TNA190A14



Electrical specifications*	
Frequency Range (MHz)	790-960
Polarization	±45°
Gain (dBi)	17
Electrical Tilt (continuously adjustable)	2 - 10
Horizontal Beamwidth (°), -3dB	65,2
Vertical Beamwidth (°), -3dB	7,2
Front to Back Ratio (dB) 180°±30° total power	>25
Cross Polar Discrimination (dB) Boresight	>19
Sidelobe suppression (dB) First sidelobe above horizon	17
First null fill (dB)	Typ 18
Impedance (Ω)	50
VSWR	< 1.5:1
Intraband isolation (dB)	> 30
Interband isolation (dB)	N/A
Intermodulation IM3 (dBc)	< -150
Max power per input (W)	300
Prepared for RET	YES

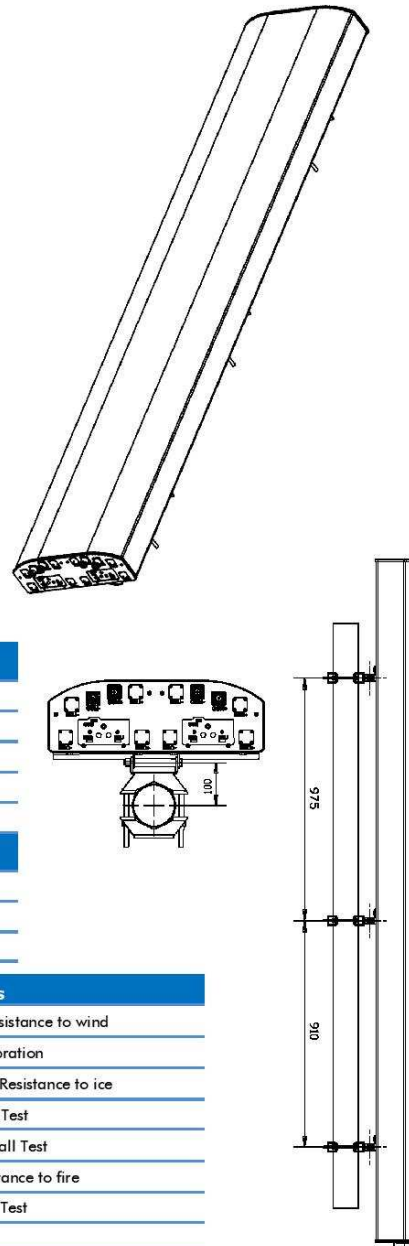
*All specifications are subject to change without notice. Refer to TELNET for the most current information.

Mechanical specifications	
Input	4 x 7/16 female
Position	Bottom, 4 (7/16)
Dimensions (mm) H x W x D	2700 x 500 x 164
Weight (Kg)	45
Max wind speed (Km/h)	200

Materials	
Radome	Fiber glass + polyester
End Caps	Plastic of high resistance for the exterior
Screws and nuts	Stainless Steel

Environmental and mechanical tests	
IEC 60068-2-2: Dry Heat	UNE-EN 60598-2-3: Resistance to wind
IEC 60068-2-56: Damp Heat Steady State	IEC 60068-2-6: Sine Vibration
IEC 60068-2-30: Damp Heat Cyclic	Particular Specification: Resistance to ice
IEC 60529: IP Code Test	IEC 60068-2-27: Shock Test
IEC 60068-2-64: Random Vibration	IEC 60068-2-32: Free Fall Test
IEC 60068-2-14: Change of Temperature	IEC 60695-2-1/2: Resistance to fire
IEC 60068-2-1: Cold	IEC 60068-2-29: Bump Test
IEC 60068-2-18: Water (Handheld shower)	

Telnet antennas have passed environmental tests recommended in ETS 300 019-2-4, and extensive test recommended by the main operators over the world



Antenas multibanda: son aquellas que disponen de arrays de antenas de múltiples bandas distintas. De este modo se puede utilizar una misma antena para radiar en bandas de frecuencias distintas y, por tanto, tecnologías diferentes. Son antenas muy utilizadas en entornos urbanos donde varios operadores comparten un mismo emplazamiento.

Product Specifications

COMMSCOPE®



CWPX31OR1

Argus® Tri-band Antenna, 790–960 MHz and 2 x 1710–2690 MHz, 65° horizontal beamwidth, internal electrical tilt with manual override. Bands cascaded SRET.



- Integrated Internal Remote Electrical Tilt (RET), with independent control of electrical tilt with manual override on all arrays
- All Internal RET actuators are connected in "Cascaded SRET" configuration

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	790–890	890–960	1710–1920	1920–2170	2300–2690
Gain, dBi	16.5	16.8	16.5	17.0	18.0
Beamwidth, Horizontal, degrees	64	62	60	60	62
Beamwidth, Vertical, degrees	8.8	8.0	8.2	7.2	5.8
Beam Tilt, degrees	0–10	0–10	0–10	0–10	0–10
USLS, dB	18	18	18	18	18
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	25	25	25	25	25
Isolation, dB	25	25	25	25	25
Isolation, Intersystem, dB	30	30	30	30	30
VSWR Return Loss, dB	1.43 15.0	1.43 15.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-150	-150	-150	-150	-150
Input Power per Port, maximum, watts	300	300	250	250	250
Polarization	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
Impedance	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm

General Specifications

Antenna Brand	Argus®
Antenna Type	DualPol® tri-band
Band	Multiband
Brand	Argus® DualPol®
Operating Frequency Band	1710 – 2690 MHz 790 – 960 MHz
Number of Ports	6

Mechanical Specifications

Connector Interface	7-16 DIN Female
Connector Location	Bottom
Connector Quantity, total	6
Lightning Protection	dc Ground inner/outer conductor
Radome Material	ASA, UV stabilized
Wind Loading, maximum	1300.0 N @ 160 km/h 292.3 lbf @ 160 km/h
Wind Speed, maximum	200.0 km/h 124.3 mph

Dimensions

Depth	209.0 mm 8.2 in
Length	2494.0 mm 98.2 in

©2014 CommScope, Inc. All rights reserved. All trademarks identified by ® or ™ are registered trademarks, respectively, of CommScope. All specifications are subject to change. See www.commscope.com for the most current information. Revised: January 29, 2014

page 1 of 2
March 5, 2014

AQU45 18R9

DXXXX-698-960/1710-2690/1710-2690/1710-2690-65/65/65/65-17i/18i/18i/17.5i-M/M/M/M-R

EasyRET Quad-Band Antenna with 4 Integrated RCUs - 2.6m



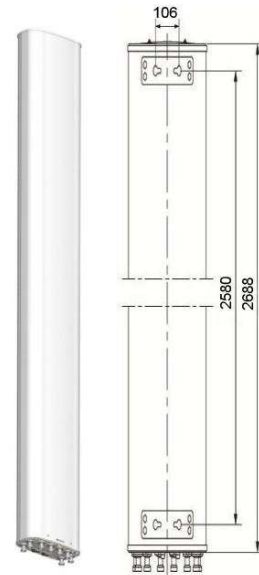
Antenna Specifications

Electrical Properties												
Frequency range (MHz)	698 - 960											
	698 - 803			790 - 862			824 - 894			880 - 960		
3 x (1710 - 2690)												
Polarization												
+45°, -45°												
Electrical downtilt (°)	0 - 10°, continuously adjustable											
Gain (dBi)	0° 5° 10° 0° 5° 10° 0° 5° 10° 0° 5° 10°											
	16.0 16.2 16.0 16.3 16.5 16.1 16.5 16.7 16.5 16.7 17.0 16.6											
	Bottom	17.0 17.1 16.9 17.2 17.3 17.0 17.0 17.1 17.0 17.3 17.6 17.3										
Top	16.7 16.8 16.6 17.0 17.1 16.7 16.9 16.8 16.6 16.8 17.3 17.1											
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (Typ.) (dB)	0° 5° 10° 0° 5° 10° 0° 5° 10° 0° 5° 10°											
18 17 16 18 18 17 18 17 17 18 16 16 17 17 16 17 16 18 17 15 16 16 15												
Horizontal 3dB beam width (°)	67 66 65 62 63 62 61 60											
Vertical 3dB beam width (°)	8.8 8.5 8.0 7.4 7.4 6.8 6.0 5.5											
VSWR	< 1.5											
Isolation between ports (dB)	Intra-system: ≥ 28 Inter-system: ≥ 30											
Front to back ratio, copolar (dB)	Typ. 27											
Cross polar ratio (dB)	0° Typ. 20											
Max. power per input (W)	500 (at 50°C ambient temperature)											
Total power per combined input (W)	1200 (at 50°C ambient temperature)											
Intermodulation IM3 (dBc)	≤ -153 (2 x 43 dBm carrier)											
Impedance (Ω)	50											
Grounding	DC Ground											

Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	2688 x 349 x 166
Packing dimensions (H x W x D) (mm)	2960 x 435 x 250
Antenna weight (kg)	33.5
Clamps weight (kg)	3.6 (2 units)
Antenna packing weight (kg)	44.5 (Included clamps)
Mast diameter supported (mm)	50 - 115
Radome material	Fiberglass
Radome colour	Light grey
Operational temperature (°C)	-40 .. +65
Wind load (N)	Frontal: 990 (at 150 km/h) Lateral: 325 (at 150 km/h) Rear side: 1030 (at 150 km/h)
Max. operational wind speed (km/h)	150
Survival wind speed (km/h)	200
Connector	8 x 7/16 DIN Female
Connector position	Bottom

Accessories

Item	Model	Description	Weight	Units per antenna
Downtilt kit	ASMDTOD01	Mechanical downtilt: 0 - 8°	2.0 kg	1 (Separate packing)



AQU45 18R18

DXXXX-690-960/690-960/1710-2690/1710-2690-65/65/65/65-16i/16i/18i/18i-
M/M/M/M-R
EasyRET Quad-Band Antenna with Integrated RCUs - 2.0m



Electrical Properties								
Frequency range (MHz)	2 x (690 - 960)				2 x (1710 - 2690)			
	690 - 803	790 - 862	824 - 894	880 - 960	1710 - 1990	1920 - 2200	2200 - 2490	2490 - 2690
Electrical downtilt (°)	0 - 10				2 - 12			
Gain (dBi)	16.0				18.0			
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (Typ.) (dB)	16				16			
Horizontal 3dB beam width (°)	65				65			
Vertical 3dB beam width (°)	11.0	9.8	9.5	9.2	7.1	6.5	5.7	5.1
VSWR	< 1.5							
Isolation between ports (dB)	≥ 28							
Front to back ratio, copolar (dB)	Typ. 26				Typ. 28			
Cross polar ratio (dB) 0°	Typ. 18				Typ. 18			
Squint (°)	Typ. 6				Typ. 6			
Tracking (dB)	Typ. 3 (within 10dB HBW)				Typ. 3 (within 10dB HBW)			
Intermodulation IM3 (dBc)	≤ -153 (2 x 43 dBm carrier)							

Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	2100 x 549 x 150
Packing dimensions (H x W x D) (mm)	2450 x 640 x 230
Antenna net weight (kg)	43
Mechanical downtilt (°)	0 - 8
Connector	8 x 7/16 DIN Female
RET type	Integrated RET
RET protocols	AISG 2.0 / 3GPP

Huawei Technologies Co., Ltd.

Bantian, Longgang District, Shenzhen 518129, P.R.China

www.huawei.com

Any previous datasheet issues become invalid.

1

Issue: 2014-11-03

**Preliminary
Issue A 2014-08-18**



5980300
5980300A 5980300G 5980300DG

- Double Triple-Band Antenna, dual polarisation, 12 connectors
- Independent tilt on each band 0°-10°/0°-12°/0°-12°
- Lightweight TwinLine platform and low windload
- MET and RET versions, AISG1.1 or 3GPP/AISG2.0
- Fully internal RET control based on our patented technologies (field replaceable)

**XXXpol / 65° Az
17.5 / 18.0 / 18.0 dBi**

Optimal profile - Low windload

Model number options: **5980300** Manual Electrical tilt Antenna
5980300A Remote Electrical Tilt Antenna (AISG1.1)
5980300G Remote Electrical Tilt Antenna (3GPP/AISG2.0)
5980300DG Remote Electrical Tilt Antenna with MDDU (3GPP/AISG2.0)

Access Ports Description (Connectors)										
This antenna is built as two identical Triple-Band Antennas, housed side by side in the same shroud. The Antenna has 12 colour coded connectors located at its bottom. See picture next page.										
R1 R2	Ultra Low Band:	690-960 MHz ports			4 x 7-16 DIN female Long Neck					
Y1 Y3	Ultra Wide Band Bottom System:	1695-2690 MHz ports			4 x 7-16 DIN female Long Neck					
Y2 Y4	Ultra Wide Band Top System:	1695-2690 MHz ports			4 x 7-16 DIN female Long Neck					
Electrical Characteristics	R1-R2			Y1-Y3 (Bottom)			Y2-Y4 (Top)			
Frequency Bands	700	800	900	1800	2100	2600	1800	2100	2600	
Gain (dBi)	tilt 0°	15.5	16.5	17.4	17.1	17.5	18.0	17.1	17.5	18.0
	tilt 5°	15.5	16.4	17.3	17.1	17.5	18.0	17.1	17.5	18.0
	tilt 10°	15.2	16.2	17.0	17.1	17.4	17.8	17.1	17.4	17.8
Input Impedance	50 ohms			50 ohms			50 ohms			
VSWR	<1.5			<1.5			<1.5			
Polarisation	±45°			±45°			±45°			
Horizontal Beamwidth (-3 dB)	75°	68°	65°	65°	63°	61°	65°	63°	61°	
Vertical Beamwidth (-3 dB)	8.6°	7.5°	6.7°	7.0°	6.4°	5.2°	6.5°	5.9°	4.7°	
Electrical Downtilt range	0° to 10°			0° to 12°			0° to 12°			
Inter/Intra Band Isolation	>30 dB			>30 dB			>30 dB			
	>28dB from 0° to 2° tilt			>28dB from 0° to 2° tilt			>28dB from 0° to 2° tilt			
Upper Side-lobe Rejection (20° sector above main beam)	18 dB typ.			18 dB typ.			18 dB typ.			
Front to back ratio@180°	>30 dB			>30 dB			>30 dB			
Front to back @180° +/-30°	>25 dB			>25 dB			>25 dB			
Maximum Power (per port)	250 W			200 W			200 W			
Intermodulation 3rd order for 2 x 20 W carriers	<-110 dBm			<-110 dBm			<-110 dBm			
Electrical Downtilt Control										
Electrical downtilt can be controlled separately for each Low or High Band array. The tilt indicators are covered by a removable transparent cap.										
Manual control: A coloured knob at the end of the tilt indicator allows change of the tilt without need for a tool. Knob colour is identical to connector colours as defined above. To access the knob, the cap is removed by turning it counter clockwise. It is re-installed by opposite rotation.										
Remote control: The remote control of the electrical tilt is managed by a module (MDCU) totally inserted at the bottom of the antenna. One single module controls individually the tilt of each band (no need of daisy chain cables between the bands). For RET control, the transparent cap must be in place and locked. This module does not add any additional length at the bottom of the antenna. The tilt angle indicator stays always visible and the antenna still has manual tilt control (manual override).										
RET module part number (one only needed per antenna)	MDCU-A0000	for AISG1.1 protocol (one unit included in 5980300A)								
	MDCU-G0000	for 3GPP/AISG2.0 protocol (one unit included in 5980300G)								
Environmental										
Operating Temperature Range	-40°C to +60°C									
Environmental	ETS 300 019									
RoHS compliant	Yes									



Antenas trisector:



MOYANO
Since 1960

GSM- UMTS- LTE - TRISECTOR TRIPLEBAND TRISECTOR 1(790-960 Mhz)+2(1710-2690 Mhz)

DUAL POLARISED
TILT VARIABLE ANTENNA

ELECTRICAL PERFORMANCE	MY-ROCKET-A306-DL-650				
• Frequency Band (MHz)	790-890	890-960	1710-1920	1920-2170	2300-2690
• Gain	16.5 dBi	16.8 dBi	16.5 dBi	17 dBi	18 dBi
• H Beamwidth -3dB	64°	62°	60°	60°	62°
• V Beamwidth -3 dB	8.8°	8°	8.2°	7.2°	5.8°
• Azimuth	Fixed				
• Polarization	± 45°				
• Electrical Tilt	0° to 10°				
• Power Handling	300 W		250 W		
• VSWR	< 1.43 ÷ 1		< 1.5 ÷ 1		
• Isolation	> 25 dB (> 30 dB intersystem)				
• Impedance	50 Ω				
• Front to Back Ratio (180° ± 30°) copolar	> 25 dB				
• 1 st Upper Sidelobe Supp.	> 18 dB				
• Squint	< 5°				
• Grating Lobe	> 10dB				
• Ret	Embedded by default				
• Intermodulation	< -150 dBc 2 x 20 w				
• Connector	18 x DIN 7/16 (F) 6x(790-960 Mhz)+ 12x(1710-2690 Mhz)				
• Lightning Protection	DC Grounded.				
• Length	650Ø x 2795 mm with short service area				
• Bracket	102 Ø mm Pipe Ready for X-BIV structure				
• Weight	140 Kg				
• Survival wind speed	200 Km/h				
• Radome material	Grey Fiberglass				
• Wind Loading	2677N@200 Km/h 602lbf@200 Km/h				



*Service area availability:
Long service area - 825 mm
Short service area - 225mm

SISTEMAS RADIANTES F. MOYANO S.A
reserves the right to vary the description
and specification in this publication

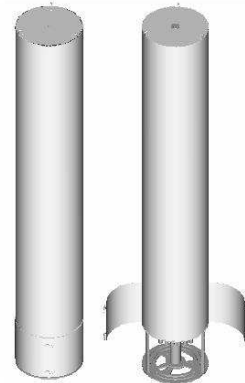
SISTEMAS RADIANTES F. MOYANO S.A
C/ Cañada, 53
28850 Torrejón de Ardoz, MADRID (SPAIN)
Tel. +34-91-6610730 Fax. +34-91-6615447

www.moyano.com

Antena Compacta Trisectorial Hexa-banda (2x790-960, 4x1710-2170MHz)

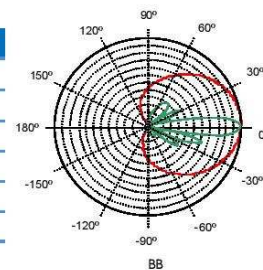
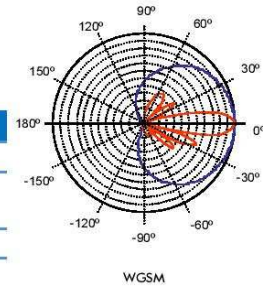
ANTENA COMPACTA

TNA690A10		
Rango de frecuencias (MHz)	790-960	1710-2170
Polarización	±45°	±45°
Ganancia (dBi)	17	17.5
Tilt Eléctrico (con ajuste continuo)	2 - 10	2 - 10
Ancho de haz horizontal (°), -3dB	65.2	56.9
Ancho de haz vertical (°), -3dB	7.2	6.5
Relación delante/atrás (dB) 180°±30°	>25	>25
Discriminación Cross Polar (dB)	>20	>23
Dirección lóbulo principal	>20	>23
Atenuación del primer lóbulo lateral sobre el horizonte (dB)	17	17
Primer null fill (dB)	Typ 20	Typ 20
Impedancia (W)	50	50
VSWR	< 1.5:1	< 1.5:1
Aislamiento Intrabanda (dB)	> 30	> 30
Aislamiento Entre bandas (dB)	> 30	> 30
Intermodulación IM3 (dBc)	< -150	< -150
Max potencia por entrada (W)	300	300
Preparado para RET	SI	SI



Características mecánicas	
Entradas	36 x 7/16 hembra
Posición de conectores	Inferior, 3x12 (7/16)
Dimensiones (mm) (H x Ø mm)	2700+300 x 635
Peso (Kg)	130
Máxima velocidad del viento (Km/h)	200
Azimut	Antena completa: ± 50° Por sector: ± 0°

Materiales	
Radomo	Fibra de vidrio + poliéster
Tapas	Plástico para exteriores de alta resistencia
Tornillería	Acero inoxidable



Ensayos mecánicos y medioambientales	
IEC 60068-2-2: Calor Seco	UNE-EN 60598-2-3: Resistencia al viento
IEC 60068-2-56: Calor Húmedo Constante	IEC 60068-2-6: Vibración sinusoidal
IEC 60068-2-30: Calor Húmedo Cíclico	Especificación particular: Resistencia al hielo
IEC 60529: Test código IP	IEC 60068-2-27: Prueba de impacto
IEC 60068-2-64: Vibración aleatoria	IEC 60068-2-32: Prueba de caída libre
IEC 60068-2-14: Variación de la temperatura	IEC 60695-2-1/2: Resistencia al fuego
IEC 60068-2-1: Frio	IEC 60068-2-29: Prueba de golpes permanentes (transporte)
IEC 60068-2-18: Agua (Ducha manual)	

Las antenas TELNET han superado las pruebas medioambientales recomendadas en la norma ETS 300 019-2-4, y los ensayos adicionales recomendados por los principales operadores mundiales

Antenas especiales:

Product Specifications

COMMScope®



Andrew Solutions HBX-3319DS-VTM

DualPol® Teletilt® Antenna, 1710–2180 MHz, 33° horizontal beamwidth, RET compatible

- Exceptional horizontal roll-off and front-to-back ratio for superior capacity efficiency
- Extended elevation tilt for maximum flexibility in urban core areas
- Rugged, reliable design with excellent passive intermodulation suppression
- Fully compatible with Andrew Teletilt® remote control system

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	1710–1880	1850–1990	1920–2180
Gain, dBi	20.5	20.7	21.0
Beamwidth, Horizontal, degrees	35	33	32
Beamwidth, Vertical, degrees	7.0	6.6	6.2
Beam Tilt, degrees	0–9	0–9	0–9
USLS, typical, dB	18	18	18
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	40	40	40
Isolation, dB	30	30	30
VSWR Return Loss, dB	1.5:1 14.0	1.5:1 14.0	1.5:1 14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-150	-150	-150
Input Power per Port, maximum, watts	300	300	300
Polarization	±45°	±45°	±45°
Impedance	50 ohm	50 ohm	50 ohm
Lightning Protection	dc Ground	dc Ground	dc Ground

Mechanical Specifications

Color Radome Material	Light gray PVC, UV resistant
Connector Interface Location Quantity	7-16 DIN Female Bottom 2
Wind Loading, maximum	465.5 N @ 150 km/h 104.7 lbf @ 150 km/h
Wind Speed, maximum	241.0 km/h 149.8 mph

Dimensions

Depth	132.0 mm 5.2 in
Length	1461.00 mm 57.52 in
Width	269.00 mm 10.59 in
Net Weight	12.70 kg 28.00 lb

Remote Electrical Tilt (RET) Information

Model with Factory Installed AISG 1.1 Actuator HBX-3319DS-R2M
Model with Factory Installed AISG 2.0 Actuator HBX-3319DS-A1M

Regulatory Compliance/Certifications

Agency	Classification
RoHS 2002/95/EC	Compliant by Exemption
China RoHS SJ/T 11364-2006	Above Maximum Concentration Value (MCV)
ISO 9001:2008	Designed, manufactured and/or distributed under this quality management system

©2012 CommScope, Inc. All rights reserved. All trademarks identified by ® or ™ are registered trademarks, respectively, of CommScope. All specifications are subject to change without notice. See www.commscope.com for the most current information. Revised: April 23, 2012

page 1 of 2
September 10, 2012

Dual-Beam Panel
Dual Polarization
Half-power Beam Width
Adjust. Electrical Downtilt
Azimuth Beam Direction
Optimized Horizontal Sidelobes

1710-2200	1710-2200
X	X
45°	45°
0°-10°	0°-10°
(-30°)	(+30°)
18dB	18dB

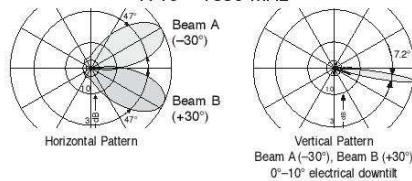
KATHREIN
 Antennen · Electronic

Downtilt set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)
 XXPol Panel 1710-2200/1710-2200 45°(-30°)/45°(+30°) 19.5/19.5dBi 0°-10°/0°-10°T

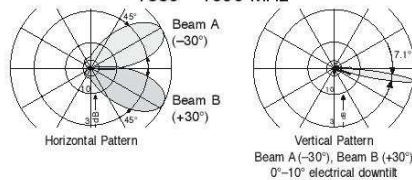
Type No.	80010606V01		
Frequency range	[1710-2200]		
	1710 - 1880 MHz	1850 - 1990 MHz	1920 - 2200 MHz
Azimuth direction	Beam A (-30°), Beam B (+30°)		
Polarization	+45°, -45°, +45°, -45°	+45°, -45°, +45°, -45°	+45°, -45°, +45°, -45°
Gain	4 x 19 dBi	4 x 19.3 dBi	4 x 19.5 dBi
Horizontal Pattern:			
Half-power beam width (offset beams ±30°)	47°	45°	43°
Front-to-back ratio	Copolars: > 30 dB Total power: > 25 dB		
Cross polar ratio			
Main direction -30°; +30°	Typically: 18 dB	Typically: 17 dB	Typically: 16 dB
Sector -60°; 0°; +60°	> 13 dB	> 13 dB	> 13 dB
Sidelobe suppression for sidelobes beside main beam	> 18 dB		
Vertical Pattern:			
Half-power beam width	7.2°	7.1°	6.8°
Electrical tilt	0°-10°, continuously adjustable		
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	> 18 dB		
Impedance	50 Ω		
VSWR	< 1.5		
Isolation, between inputs	> 30 dB		
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	200 W (at 50 °C ambient temperature)		



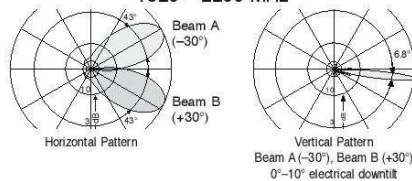
Dual Beam Antenna Patterns:
 1710 - 1880 MHz



1850 - 1990 MHz



1920 - 2200 MHz



936 4001/a Subject to alteration.

1710-2200 -45° Beam B (+30°)	1710-2200 +45° Beam B (+30°)	1710-2200 +45° Beam A (-30°)	1710-2200 -45° Beam A (-30°)
7-16	7-16	7-16	7-16

Mechanical specifications	
Input	4 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Wind load	Frontal: 710 N (at 150 km/h) Lateral: 200 N (at 150 km/h) Rearside: 820 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Height/width/depth	1314 / 380 / 150 mm
Category of mounting hardware	M (Medium)
Weight	19 kg / 21 kg (clamps incl.)
Packing size	1696 x 402 x 172 mm
Scope of supply	Panel and 2 units of clamps for 50 - 115 mm diameter

Internet: www.kathrein.de

80010606v01 Page 1 of 3

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Straße 1 - 3 · P.O. Box 10 04 44 · 83004 Rosenheim · Germany · Phone +49 8031 184-0 · Fax +49 8031 184-973

Antenas microcelulares:

Indoor Multi-band Omni Antenna Vertical Polarization

806–960 1425–3800 5150–6000

KATHREIN
Antennen · Electronic

V

- The antenna can be operated in all frequency ranges simultaneously.
- The antennas need no additional groundplane.

VPol Indoor 806–960/1425–3800/5150–6000 360° 2dBi

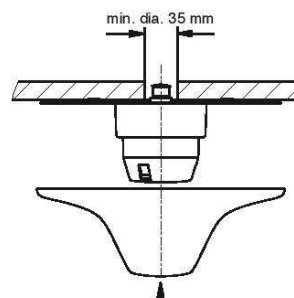
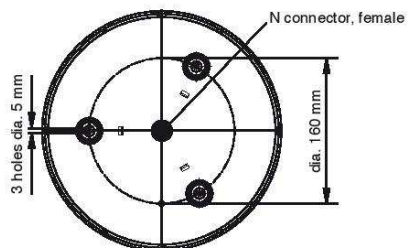
Type No.	800 10249
Frequency range	806 – 960 MHz 1425 – 3800 MHz 5150 – 6000 MHz
Polarization	Vertical
Gain	≈ 2 dBi
Impedance	50 Ω
VSWR	806 – 960 MHz: < 1.5 1425 – 1710 MHz: < 2.0 1710 – 2200 MHz: < 1.4 2200 – 3800 MHz: < 1.6 5150 – 6000 MHz: < 2.0
Max. power	50 W (at 50 °C ambient temperature)
Input	1 x N female
Protection class	IP 30
Weight	466 g
Packing size	277 x 277 x 169 mm
Diameter	258 mm
Height	94 mm (without connector)



Material: Reflector: Aluminum.
Radome: High impact polystyrol, colour: White.
Additional painting is possible.

Mounting: Three holes in the base enable a mounting on the ceiling. Two types of screws are supplied. For the N connector a hole in the ceiling with a diameter of 35 mm is required.

Available accessories: Broadband power splitters and tappers (800 – 2500 MHz).



Clip the protective housing into position after the antenna has been mounted with the help of the three supplied screws.

Indoor
VPol

**Indoor Multi-band
Directional Antenna
Vertical Polarization
Half-power Beam Width
Integrated Combiner**

806-960 1710-2700

V V

90° 90°

C

KATHREIN

Antennen · Electronic

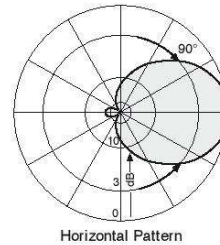
Preliminary Issue

VVPol Indoor 806-960/1710-2700 C 90° 7dBi

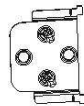
Type No.	800 10465
Frequency range	806 – 960 MHz / 1710 – 2700 MHz
Polarization	Vertical
Gain	Approx. 7 dBi
Half-power beam width	Horizontal: Approx. 90°
Impedance	50 Ω
VSWR	806 – 960 MHz: < 2.0 1710 – 2200 MHz: < 2.0 2200 – 2400 MHz: < 2.5 2400 – 2700 MHz: < 2.0
Max. power	50 W (at 50 °C ambient temperature)
Input	Cable RG 223/CU of 1m length, white, with N female connector
Protection class	IP 30
Weight	500 g
Packing size	363 x 152 x 62 mm
Height/width/depth	231 / 140 / 50 mm



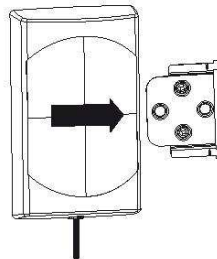
- Material:** Reflector: Aluminum.
Radome: High impact polystyrol, colour: White.
Additional painting is possible.
Mounting plates: Stainless steel.
- Mounting:** Two holes of 6 mm diameter in the mounting plate.
Screws are not supplied.
Avoid to stress the cable.
- Grounding:** All metal parts inclusive the inner conductor are DC grounded.
- Available accessories:** Broadband power splitters and tappers (800 – 2700 MHz).



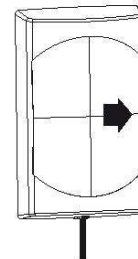
Mounting:



Mount the attachment plate to the wall using two screws of 4 mm diameter in the position as indicated.



Align the antenna over the attachment plate.



Pull the antenna to the stop.

Indoor
VPol

Product Specifications

COMMScope®

CMAX-OMH-CPUSEi

Cell-Max™ Omni MIMO In-building Antenna, V-POL PORT 698-960 / 1710-2700MHz and H-POL PORT 1710-2700MHz

POWERED BY



Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	698-800	800-960	1710-2700
Gain, dBi	1.5	1.5	3.5
Beamwidth, Horizontal, degrees	360	360	360
Isolation, dB			25
VSWR Return Loss, dB	1.9 10.1	1.5 14.0	1.8 10.9
PIM, 3rd Order, 2 x 10 W, dBc	-150	-150	-150
Input Power per Port, maximum, watts	50	50	50

Mechanical Specifications

Color Radome Material	White ABS, UV resistant
Outer Diameter	204.0 mm 8.0 in
Net Weight	0.5 kg 1.1 lb



Capítulo 4
PLANIFICACIÓN RADIO LTE DEL MUNICIPIO DE
ROTA

4. Planificación Radio LTE del municipio de Rota

4.1. Introducción

En el presente capítulo se diseña una red celular de Telefonía Móvil LTE para la ciudad de Rota. Se tendrá en cuenta el proceso de planificación descrito en el capítulo 3 y las particularidades de la ciudad.

El entorno de simulación que se emplea para su cálculo es una herramienta basada en los distintos modelos de propagación y, consta de cartografía en tres dimensiones (3D) para la ciudad objeto de analizar.

Se resumen las principales características de la aplicación y con posterioridad se entra en detalle de la red propuesta dividida por fases.

4.2. Herramienta de simulación

La mayor parte de los operadores móviles mundiales poseen una herramienta de cálculo profesional para distintas aplicaciones prácticas, como pueden ser cálculo de coberturas teóricas en zonas urbanas, redes de carreteras, ámbito rural e incluso para la dotación de diferentes servicios en función de la calidad ofrecida.

Asimismo, existen consultorías especializadas en el diseño de redes a través de internet sin tener la necesidad de contar con cartografías 3D debido a que elevan el coste de la simulación pretendida.

Un ejemplo es la plataforma de Xirio Online en su página web www.xirio-online.com.



Figura 106. Consultor para simulación de cobertura

4.3. Modelos de propagación

La estimación de coberturas es un problema que sólo puede abordarse mediante simplificaciones teóricas o aproximaciones empíricas, las cuales se consolidan en definiciones de modelos de propagación. Un modelo de propagación puede verse como un algoritmo, que basándose en unas determinadas hipótesis, permite calcular la atenuación que sufre la señal radiada por la estación base hasta ser recibida por el móvil.

Existen una gran variedad de modelos de propagación, entre los que podemos destacar los siguientes [37]:

- Trazado de Rayos:

El Trazado de Rayos utiliza una aproximación de las ecuaciones de Maxwell basada en el uso de técnicas de óptica geométrica (GO) y teoría de la difracción (GTD o UTD), válida cuando los obstáculos son bastante mayores que la longitud de onda. La característica primordial de los modelos basados en la GTD es que combinan la representación de rayos con la difracción. Además, no son empíricos, sino que calculan el campo en recepción por consideraciones estrictamente electromagnéticas, es decir, se considera el campo recibido como suma vectorial de rayos de los que se conocen amplitud y fase.

Las contribuciones de la señal se pueden obtener a partir de los siguientes tipos de rayos:

- Campo directo.
- Campo reflejado.
- Campo debido a la propagación sobre tejados (con difracción por subida y por bajada).
- Campo reflejado en fachadas (una o varias reflexiones).
- Campo debido a difracción en las esquinas de los edificios.

A continuación se muestran los parámetros típicos de este modelo de propagación en cualquier herramienta:

Parámetro	Descripción	Valor por defecto
Radio (lambda)	Radio alrededor del receptor sobre el que se evalúa el campo	10
Número de puntós	Número de puntós distribuidos uniformement alrededor del receptor	61
Pérdidas interaz (edificio)	Pérdidas de interfaz en edificios	10
Pérdidas por metro (edificio)	Atenuación específica en interior de edificios	0,5
Pérdidas interfaz (vegetación)	Pérdidas en la interfaz en una zona arbolada	0,2
Pérdidas por metro (vegetación)	Pérdidas al atravesar una superficie arbolada	0,05
Factor A1 (hacia delante)	Factor de corrección en propagación hacia delante	35
Factor A1 (hacia atrás)	Factor de corrección en propagación hacia atrás	25
Difracciones	Número de difracciones	1
Resolución angular	Precisión angular, indica cada cuántos grados se lanza un rayo	1
Potencia mínima	Si la atenuación de un rayo alcanza este valor, no se considera	200
Rugosidad*	Factor utilizado en el cálculo de coeficientes de difracción y reflexión	4
Altura receptor	Altura del receptor (en metros)	1,5
A LoS (*)	Pérdida adicional para el enlace LoS	0
B LoS (*)	Factor de corrección de la distancia para el enlace LoS	23
A nLoS (*)	Pérdida adicional para el enlace nLoS	0
B nLoS (*)	Factor de corrección de la distancia para el enlace nLoS	19
Coficiente Difracción (*)	Coficiente que se aplica a las pérdidas por difracción o reflexión en el plano vertical	1

*Ajuste de modelo

Tabla 10. Ejemplo de Parámetros del Trazado de Rayos.

- Walfish-Ikegami (COST 231):

Modelo propuesto por el grupo de desarrollo de la Acción Especial europea COST 231 para aplicar en ciudades europeas típicas. Este método considera que la pérdida básica de propagación está compuesta por tres términos fundamentales, que se corresponden con los principales fenómenos físicos implicados en la propagación en el caso de entornos urbanos:

- Pérdidas de espacio libre.
- Pérdidas por difracción tejado-calle, que hacen referencia a las pérdidas por difracción en el último obstáculo (edificio) desde el tejado hasta el nivel de calle.
- Pérdidas por difracción multipantalla, correspondientes a las pérdidas por difracción en múltiples obstáculos interpuestos entre el transmisor y el receptor.

En modelo Walfish-Ikegami se hace distinción entre los puntos en los que existe visión directa y los que no, de forma que en el primer caso sólo se considera el término de pérdidas por espacio libre y en el segundo se incluyen las tres componentes de pérdidas.

Las expresiones utilizadas para los dos términos de pérdidas por difracción son de carácter empírico.

- Xia:

Método de naturaleza semi-empírica aplicable en entornos urbanos. Se basa en la teoría de rayos y óptica geométrica. Para estimar las pérdidas se considera la influencia de los edificios interpuestos en el trayecto entre la estación base y el móvil. Se utiliza un perfil en el que se evalúan las alturas, separaciones y anchuras de calle medias.

A diferencia con el método Walfish-Ikegami, en éste no se hace distinción entre los puntos en los que existe visión directa y los que no, ya que las propias expresiones del modelo tienen en cuenta la diferencia en ambos casos.

Las expresiones utilizadas para los dos términos de pérdidas por difracción se obtienen a partir de simplificaciones de expresiones teóricas.

Asimismo, emplea diferentes fórmulas para calcular los dos términos de pérdidas de difracción, según la altura de la antena sobre el nivel medio de edificios, de modo que se distinguen tres posibles situaciones: antena del transmisor por encima, próxima o por debajo del nivel medio de edificios (caso habitual de las microcélulas).

- Longley Rice:

Modelo clásico de propósito general desarrollado por el ITS y la NTIA norteamericanas, de carácter estadístico al que se le han añadido correcciones por morfología.

- FCC PTP:

El modelo PTP es un método muy sencillo propuesto recientemente por el FCC para la planificación y obtención de contornos de cobertura para las bandas de FM, que puede ser aplicado también en la banda de 900 MHz. Este método se ha incorporado con el objetivo de poder disponer de un algoritmo simple de predicción rápida.

- Anderson 2D:

Este modelo es el recomendado por la TIA/EIA norteamericana y se basa más en fundamentos físicos que empíricos. Como resultado de campañas de medidas realizadas por la TIA/EIA este método resulta ser el más preciso de todos los que fueron comparados.

Para la elaboración de los distintos mapas de cobertura, en las configuraciones de cálculo se incluyen aquellos parámetros adicionales a los parámetros propios de cada modelo y que son necesarios para los cálculos de propagación.

La gran complejidad de los mecanismos de radiopropagación hace que en la práctica sea imposible disponer de métodos totalmente exactos en todos los ámbitos y escenarios de cálculo posibles. En todo momento los resultados proporcionados por los modelos de propagación deben interpretarse como estimaciones, las cuales tendrán mejor o peor exactitud en unos casos y en

otros. Para poder tener en cuenta este hecho y poder mejorar la exactitud de los cálculos se efectúa la calibración o ajuste de los modelos de propagación, utilizándose para ello mediciones de campo.

Si se define el *error de planificación como la diferencia entre los niveles estimados y los valores medidos*, el objetivo del proceso de ajuste es encontrar el conjunto de parámetros del modelo utilizado que minimiza el error de planificación global o el modelo de propagación que minimiza este error de planificación.

Dadas las características de los modelos de propagación se pueden plantear dos tipos de ajuste: el ajuste de algunos de los parámetros del modelo, y el ajuste de las constantes de corrección por morfología.

El método usado para la elaboración de las coberturas teóricas es el de trazado de rayos debido fundamentalmente a que utiliza una predicción determinista y no empírica y, sobre todo, a que el programa utilizado para la generación de los mapas de cobertura en el presente Trabajo Fin de Máster posee cartografía de alta precisión.

4.4. La ciudad de Rota

La zona Objeto de Servicio abarca el término municipal de Rota, en la provincia de Cádiz. Cuenta con un total de 29.179 habitantes (INE 2014).

Su extensión superficial es de 84 km² y limita con las ciudades de Chipiona, Sanlúcar de Barrameda y El Puerto de Santa María. Se encuentra situada a una altitud de 9 metros y a 36 kilómetros de la capital de provincia, Cádiz. En el municipio se pueden destacar dos partes diferenciadas, la Villa de Rota y la zona de Costa Ballena.

Situada junto a la bahía de Cádiz en la costa de Océano Atlántico, a medio camino entre Portugal y Gibraltar, es una ciudad eminentemente turística, un destino vacacional para viajeros procedentes de todos los puntos de Europa. En temporada baja, su principal actividad comercial es la industria pesquera. En su término municipal está enclavada la Base Naval de Rota.

El pinar costero, plantado a principios de siglo, es el espacio natural más importante. Compuesto principalmente por pino piñonero y retama blanca. Señalar el sistema de dunas tanto en estas costas como en el recinto de la Base Naval, éste último, que constituye un auténtico santuario para algunas especies.

El animal que destaca dentro de la amplia fauna de aves, reptiles e insectos es el camaleón común; especie catalogada de vulnerable, que ha vivido momentos difíciles, pero que se ha recuperado paulatinamente gracias a algunos programas de conservación.

La ciudad de Rota es marco de importantes celebraciones y eventos entre los que se destacan la Semana Santa, Carnaval, Feria de Primavera, Romería de San Isidro Labrador, Feria de la Urta, celebrada en agosto, declarada de interés turístico y sus fiestas Patronales, día de Nuestra Señora del Rosario Coronada, patrona de la Villa.

A continuación se muestran algunas fotografías de la ciudad costera:

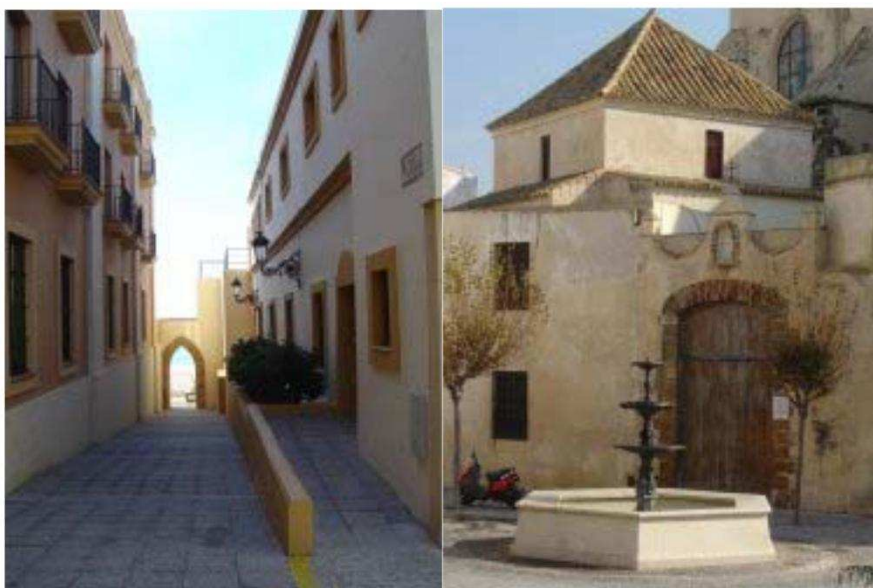


Figura 107. Fotografías de la ciudad de Rota

En la web oficial del Ayuntamiento de Rota se muestran las zonas de la población identificadas según el callejero de la misma. Se dividen en 4 zonas.

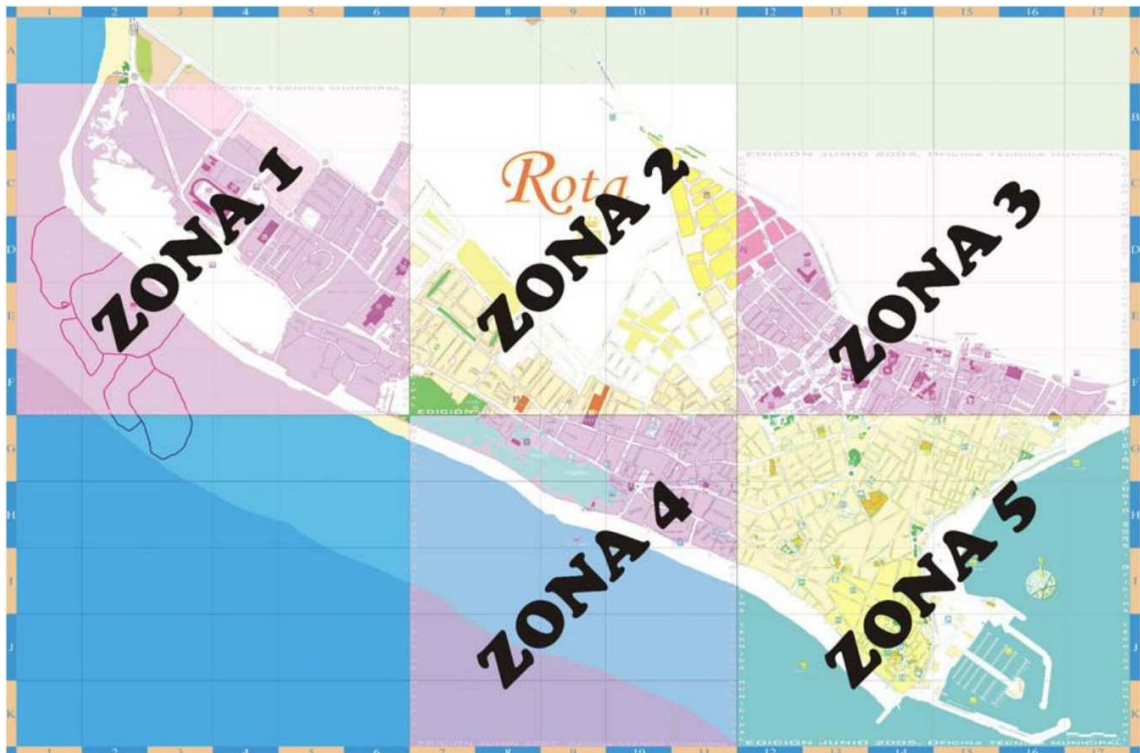


Figura 108. Zonas callejero de Rota

- Zona 1: Noroeste de la ciudad. Es la zona con menor densidad de población.



Figura 109. Zona 1. Ciudad de Rota.

- Zona 2: Noroeste de la ciudad. Densidad de población medio-baja. Comprende el inicio del Polígono Industrial y urbanizaciones en el borde del casco histórico.



Figura 110. Zona 2. Ciudad de Rota.

- Zona 3: Este de la ciudad. Acceso a la población desde El Puerto de Santa María. Densidad de población media-alta.



Figura 111. Zona 3. Ciudad de Rota.

- Zona 4: Suroeste de la población, concretamente el área de la Avenida de la Diputación y Avenida de los Príncipes de España.



Figura 112. Zona 4. Ciudad de Rota.

- Zona 5: Comprende la gran parte del casco histórico de la ciudad, que corresponde al sureste.



Figura 113. Zona 5. Ciudad de Rota.

4.5. Fases de Planificación de la Red LTE

Para realizar una correcta planificación de la red de 4ª Generación en la ciudad de Rota se descompone el diseño en distintas fases de planificación. Las fases se rigen en función de los objetivos de cobertura y servicios prevista por el operador y, por tanto, tiene un carácter económico muy presente.

A continuación se muestra una tabla con las fases del diseño:

FASE DE PLANIFICACIÓN	OBJETIVOS PRINCIPALES
Fase 0 ó Despliegue inicial	Despliegue inicial de eNodosB equidistantes. En zonas densas de población (centro del caso urbano) se diseña un emplazamiento cada 900-1000 metros de distancia. El objetivo es proporcionar cobertura al centro histórico de la ciudad y zonas aledañas.
Fase 1	Densificación de emplazamientos en el casco urbano y despliegue en el extrarradio y, por tanto en zonas menos densas.
Fase 2	Subsanación de problemas de cobertura detectados mediante densificación de aquellas zona con deficiencias
Fase 3	Peticiones singulares. Dotar de servicio de banda ancha a clientes específicos según reclamaciones comerciales o planes estratégicos de la operadora

Tabla 11. Fases de diseño.

El área de la población que se pretende analizar se muestra en la figura siguiente:

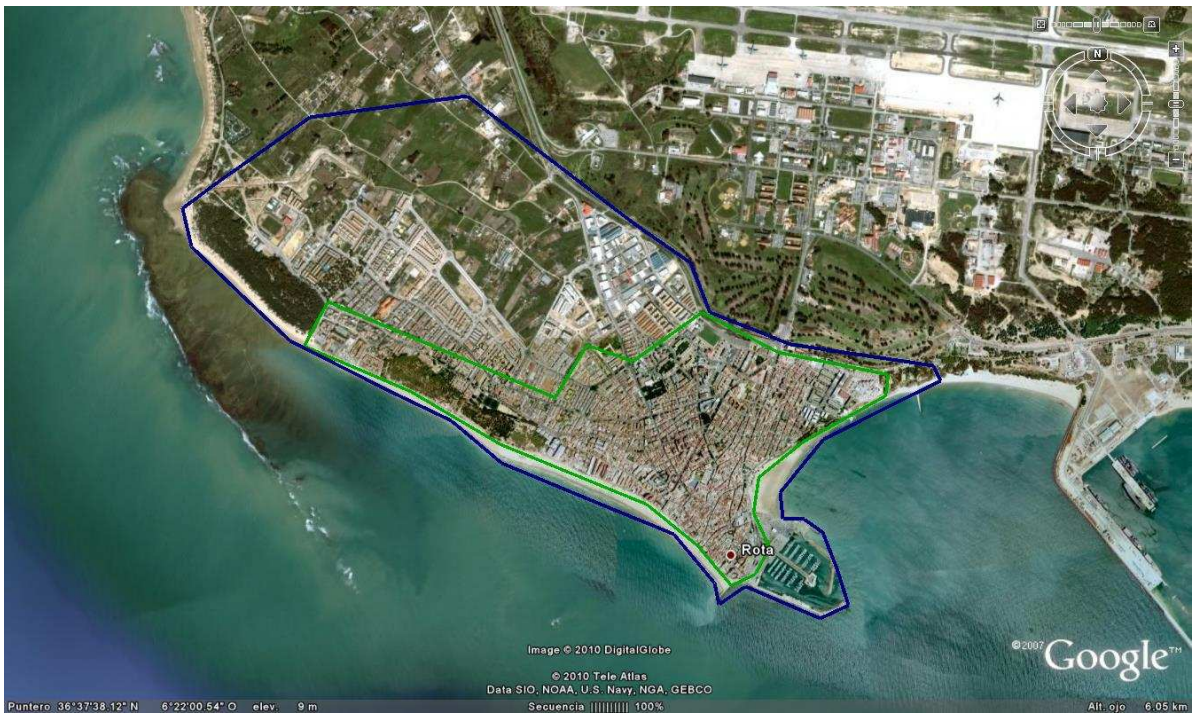


Figura 114. Área de estudio. Ciudad de Rota.

El área marcada en azul es la zona de simulación objeto de estudio. En cambio, la zona verde es franja de la que se dispone de cartografía en 3D.

4.5.1. Fase 0. Despliegue Inicial LTE

La distancia entre las estaciones base de la fase 0 es de 900 ó 1000 metros aproximadamente. Con dicha distancia no se puede garantizar cobertura en toda la población, pero si en un porcentaje muy elevado si a cobertura de exteriores se refiere.

Antes de analizar la posible ubicación de las estaciones base, se deciden instalar antenas de modelo BG D3-800TV de la marca RYMSA, ya que se dispone de sus características en el programa de diseño. El diagrama de radiación de dicha antena es el que sigue [38]:

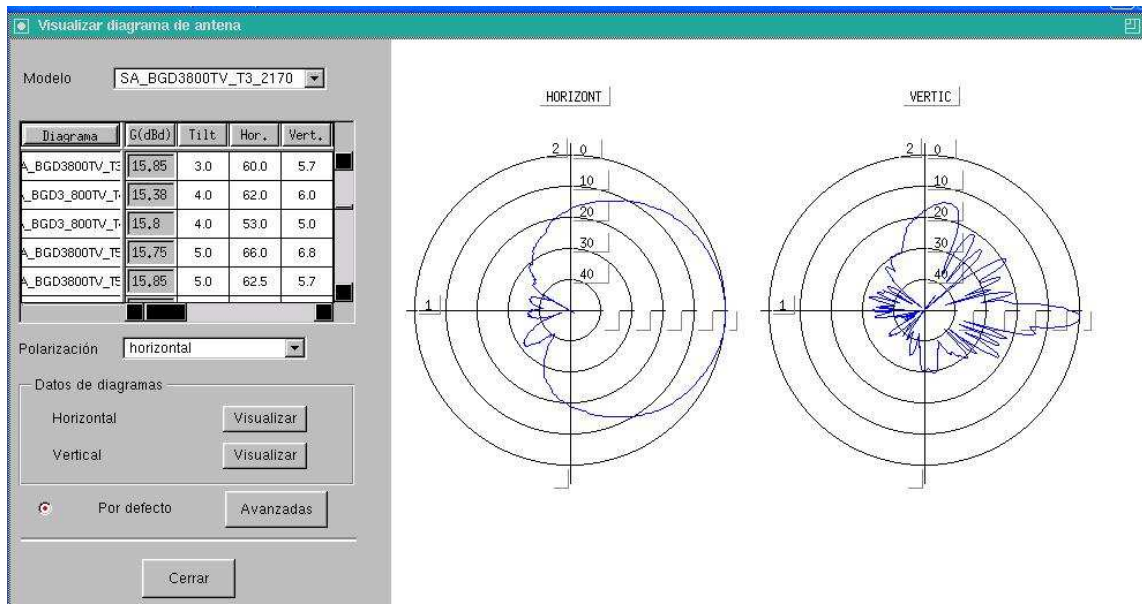


Figura 115. Diagrama de radiación. Antena Seleccionada.

Asimismo, los parámetros de instalación y configuración son los que se exponen a continuación:

- Configuración trisectorial (3 sectores por emplazamiento).
- Configuración distribuida 1/1/1. Una portadora por sector.
- Orientación de antenas 0° , 120° y 240° para los sectores 1, 2 y 3 respectivamente.
- Antenas de haz horizontal entre 60° y 65° , haz vertical entre 5° y 7° y una ganancia aproximada de 17-18 dBi. En la siguiente figura se aprecia el diagrama de radiación típico de la antena a instalar.
- *Tilt* eléctrico de 6° - 8° en entornos urbanos para el despliegue inicial.
- *Tilt* eléctrico de 4° - 6° en entorno semiurbano y rural.
- Potencia transmitida de 20 W en boca de antena (43 dBm).
- Pérdidas en los cables coaxiales 1 dB debido a una configuración distribuida de equipos.
- Emplazamiento tipo torre. Se alcanzan torres de 35 metros debido a la ordenanza municipal de Rota.
- Todos los emplazamientos se mimetizan para minimizar el impacto visual (ver capítulo 5).
- Se diseña la red en función de las alturas de los edificios. Así, se emplea la herramienta gratuita de Street Map de Google y Google Earth para determinar los edificios idóneos.
- Modelos de propagación empleados:

Ámbito semiurbano ó rural: Okumura Hata Rural o Ámbito urbano: Trazado de Rayos

Se muestra en la siguiente figura los emplazamientos designados mediante chinchetas en la herramienta Google Earth:

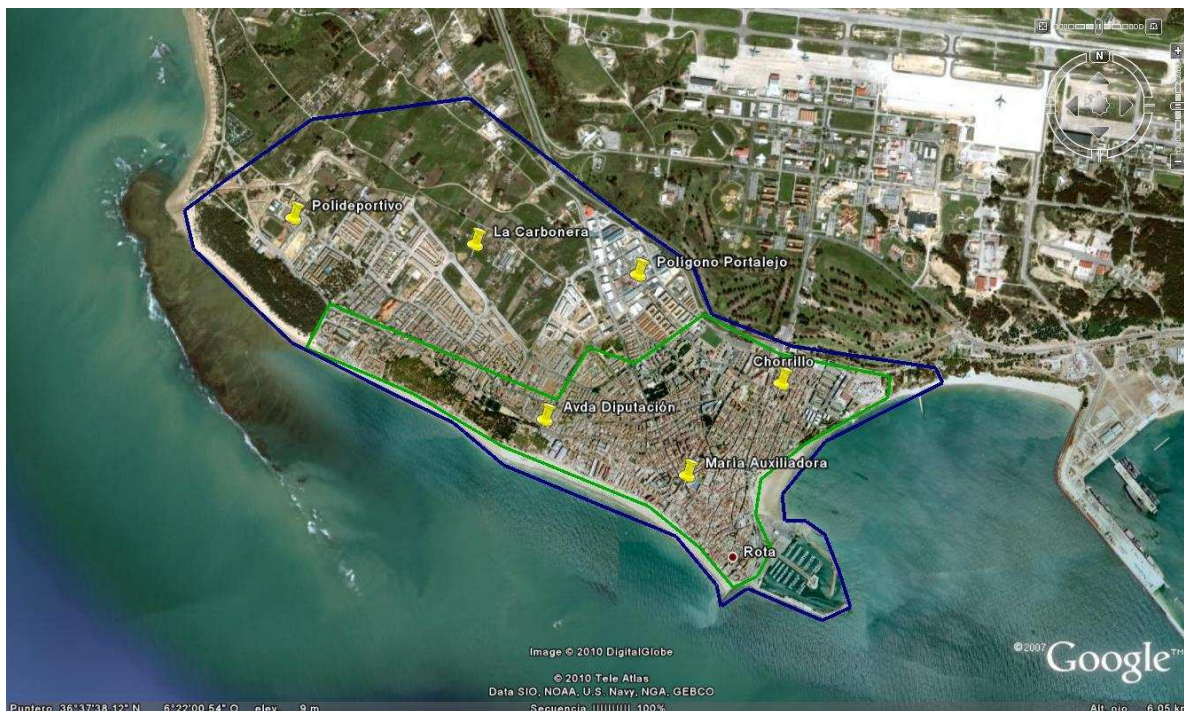


Figura 116. Ubicación emplazamientos Fase 0.

La relación de emplazamientos correspondientes a la fase 0 suman un total de seis estaciones base de configuraciones similares y antes mencionadas. Los nombre asignados y sus coordenadas geográficas con Huso 30 y Datum WGS84 son:

NOMBRE DE ESTACIÓN BASE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA EDIFICIO / TORRE
<i>POLIDEPORTIVO</i>	36°38'3,09"N	6°23'14,13"O	Torre de 25 m.
<i>LA CARBONERA</i>	36°37'58,22"N	6°22'31,15"O	Torre de 25 m.
<i>POLIGONO PORTALEJO</i>	36°37'52,31"N	6°21'52,31"O	Torre de 25 m.
<i>AVDA DIPUTACIÓN</i>	36°37'24,59"N	6°22,14,78"O	Edificio de 26 m.
<i>CHORRILLO</i>	36°37'31,82"N	6°21'19,33"O	Edificio de 26 m.
<i>MARÍA AUXILIADORA</i>	36°37'14,17"N	6°21'40,86"O	Edificio de 35 m.

Tabla 12. Emplazamientos Fase 0.

A continuación se muestra las pérdidas que sufre la señal en todo el área de simulación [2]:

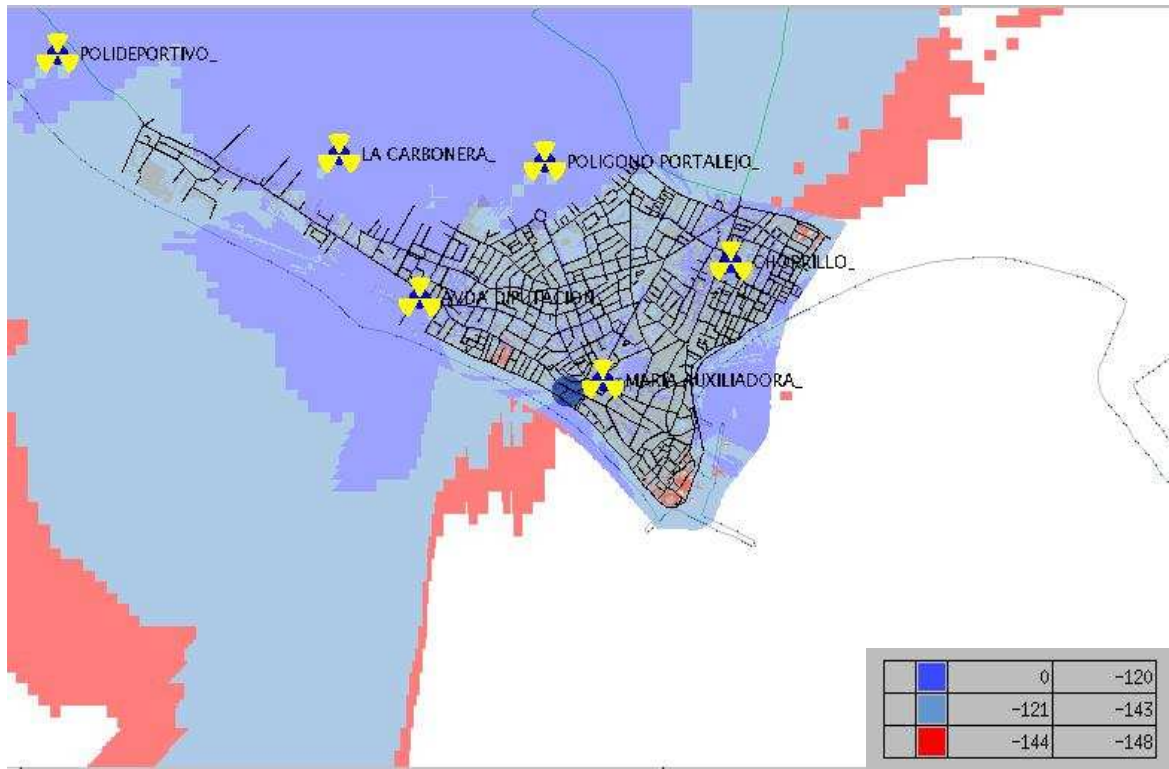


Figura 117. Pérdidas de propagación del área de simulación. Fase 0.

La leyenda de la correspondencia entre colores y pérdidas de propagación radio es la que sigue [2]:

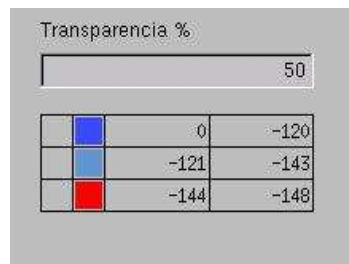


Figura 118. Leyenda. Pérdidas de señal en dB.

En el presente capítulo se tendrá en cuenta la leyenda anterior para todos los planos referentes a pérdidas de señal o propagación.

El servicio de datos no se garantiza a partir de 143 dB de pérdidas en el enlace, por lo que en la figura 117 se aprecia claramente que el servicio se ofrece en la mayor parte de la población.

El nivel de señal esperado, por tanto, en las diferentes zonas de la ciudad y extrarradio de Rota, es el que sigue [2].

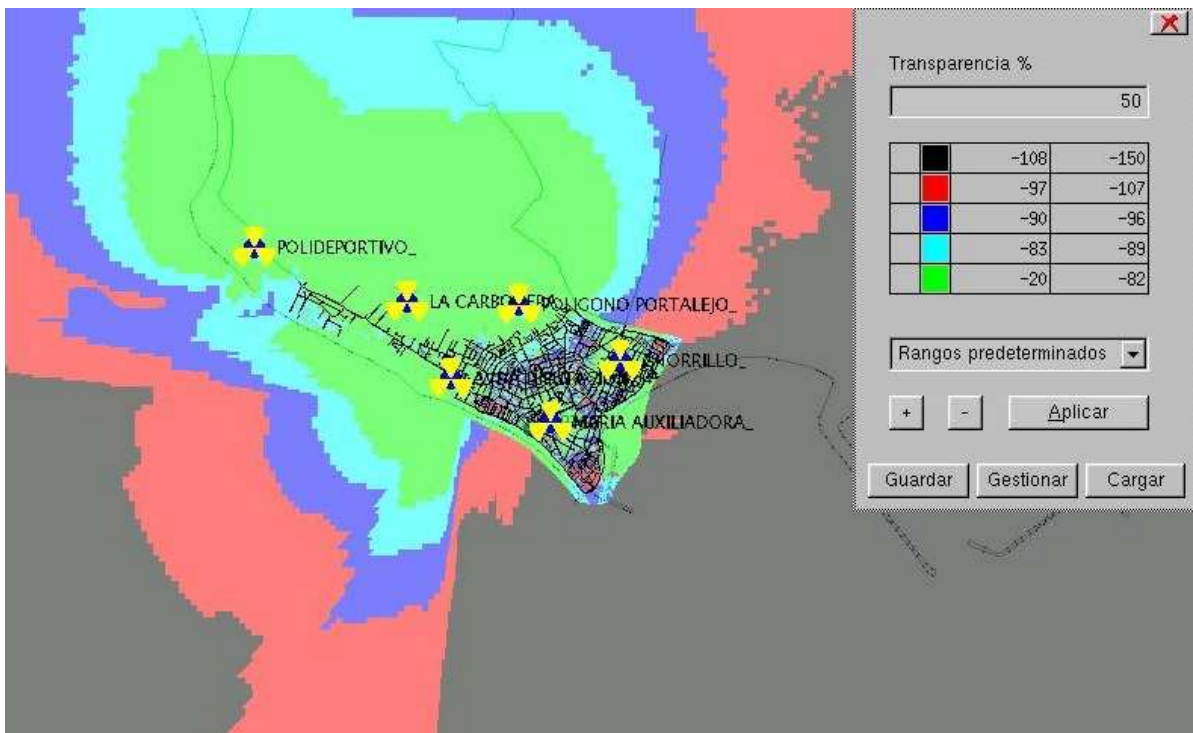


Figura 119. Cobertura. Nivel de RSRP esperado en Fase 0.

La leyenda de niveles que se tendrá en cuenta en el capítulo es la que sigue [2]:

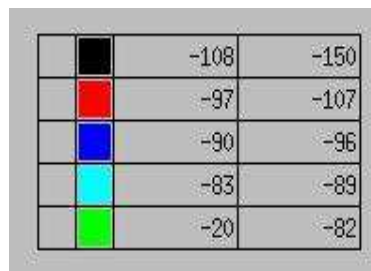


Figura 120. Leyenda de niveles de cobertura ó RSRP.

A continuación se muestra la distribución del nivel de RSRP esperado aumentado para poder diferenciar el comportamiento de cada emplazamiento [2].

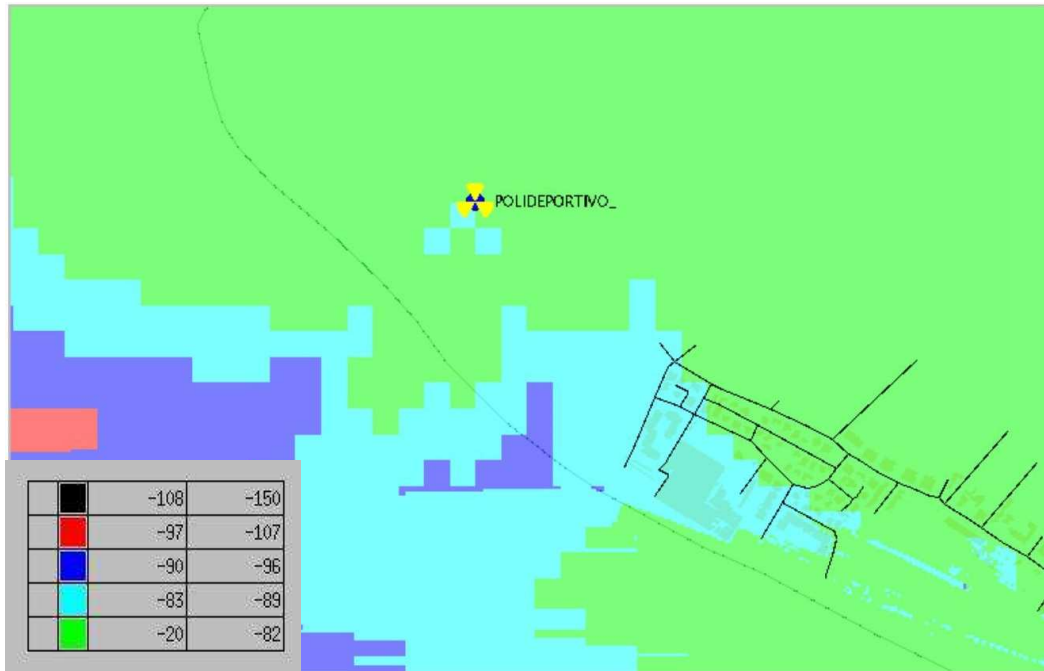


Figura 121. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. POLIDEPORTIVO. Fase 0.

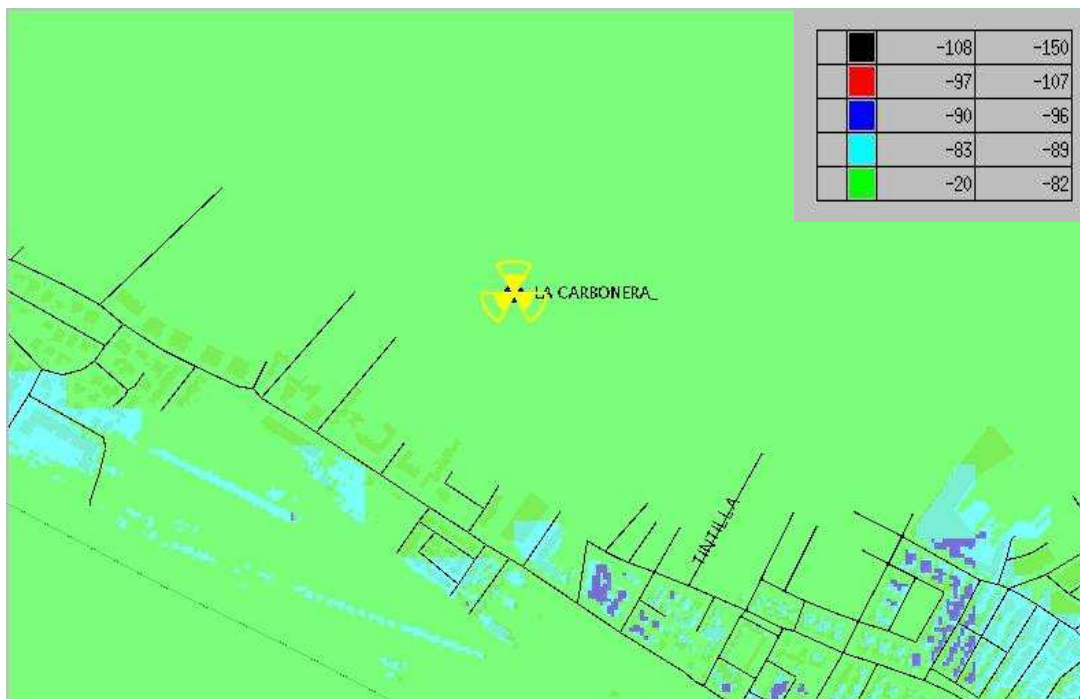


Figura 122. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. LA CARBONERA. Fase 0.

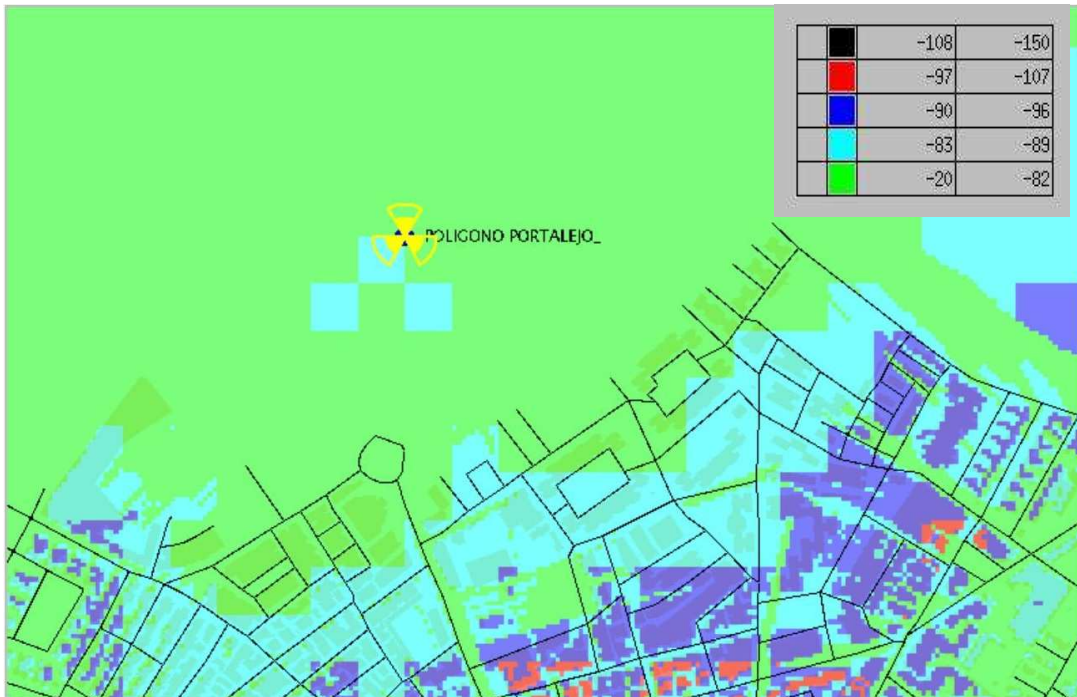


Figura 123. Cobertura. Nivel RSRP POLIGONO PORTALEJO. Fase 0.



Figura 124. Cobertura. Nivel RSRP emplazamiento CHORRILLO. Fase 0.

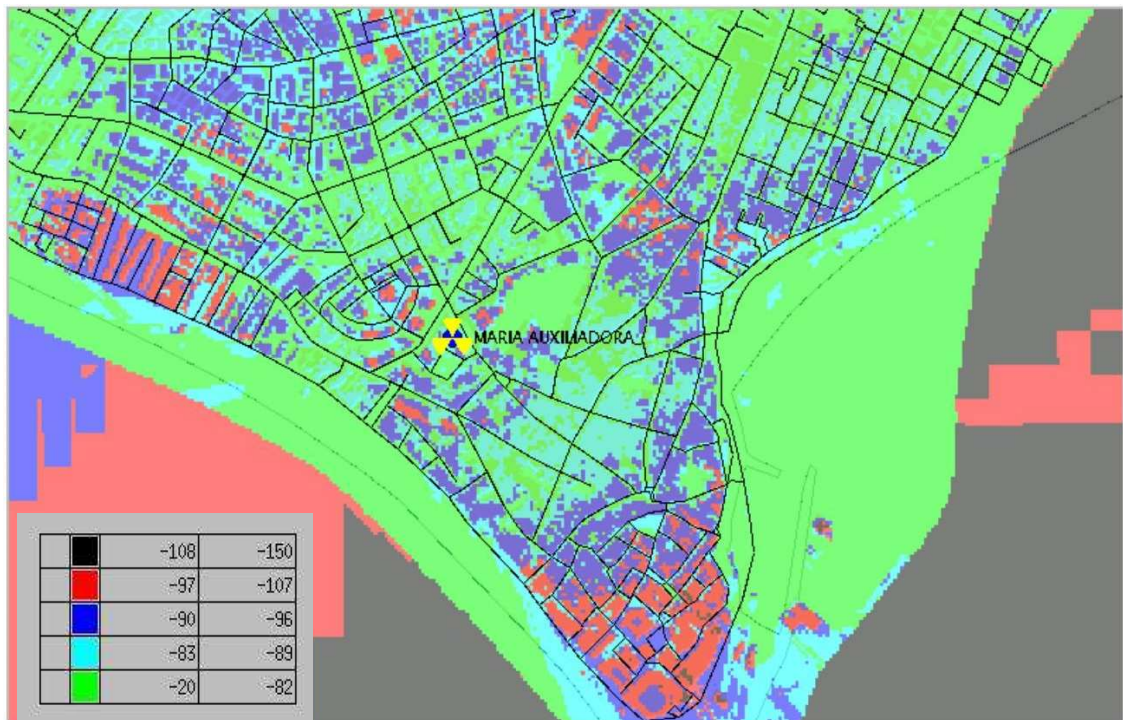


Figura 125. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. MARIA AUXILIADORA. Fase 0.

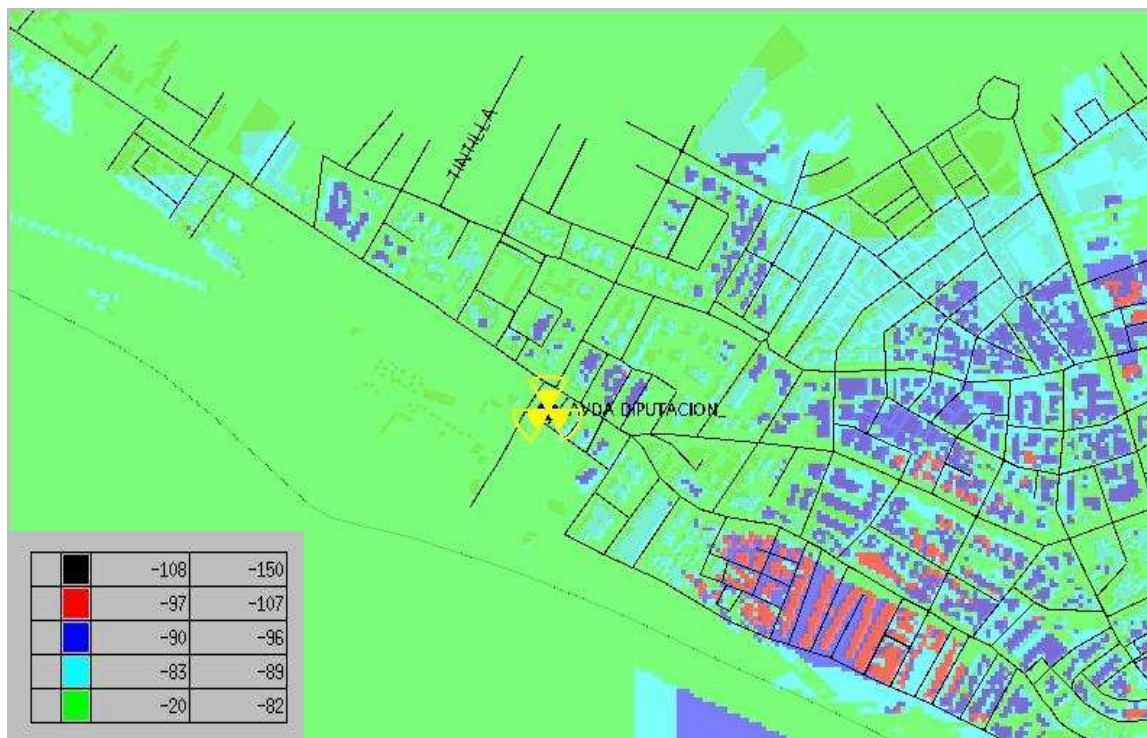


Figura 126. Cobertura. Nivel RSRP emplazamiento AVDA DIPUTACION. Fase 0.

Como es de esperar, en entornos rurales o semiurbanos, en los que no se dispone de cartografía en tres dimensiones, los resultados son mejores a los que se obtienen con simulaciones en entornos urbanos densos y con cartografía. Por consiguiente, los emplazamientos POLIDEPORTIVO, LA CARBONERA y POLIGONO PORTALEJO, obtienen resultados mejores a los esperados en la realidad, ya que realmente no se trata de entornos rurales sino que a falta de planos cartográficos, se realizan simulaciones con métodos de propagación inadecuados (aplicación de métodos de simulación rurales a entornos urbanos nuevos o semiurbanos).

Por lo comentado anteriormente, la simulación se hace más efectiva en el casco histórico de la ciudad debido a una gran precisión de la cartografía disponible.

Se muestra un aumento de la imagen de cobertura, en cuanto a nivel de RSRP, en el caso urbano [2]:

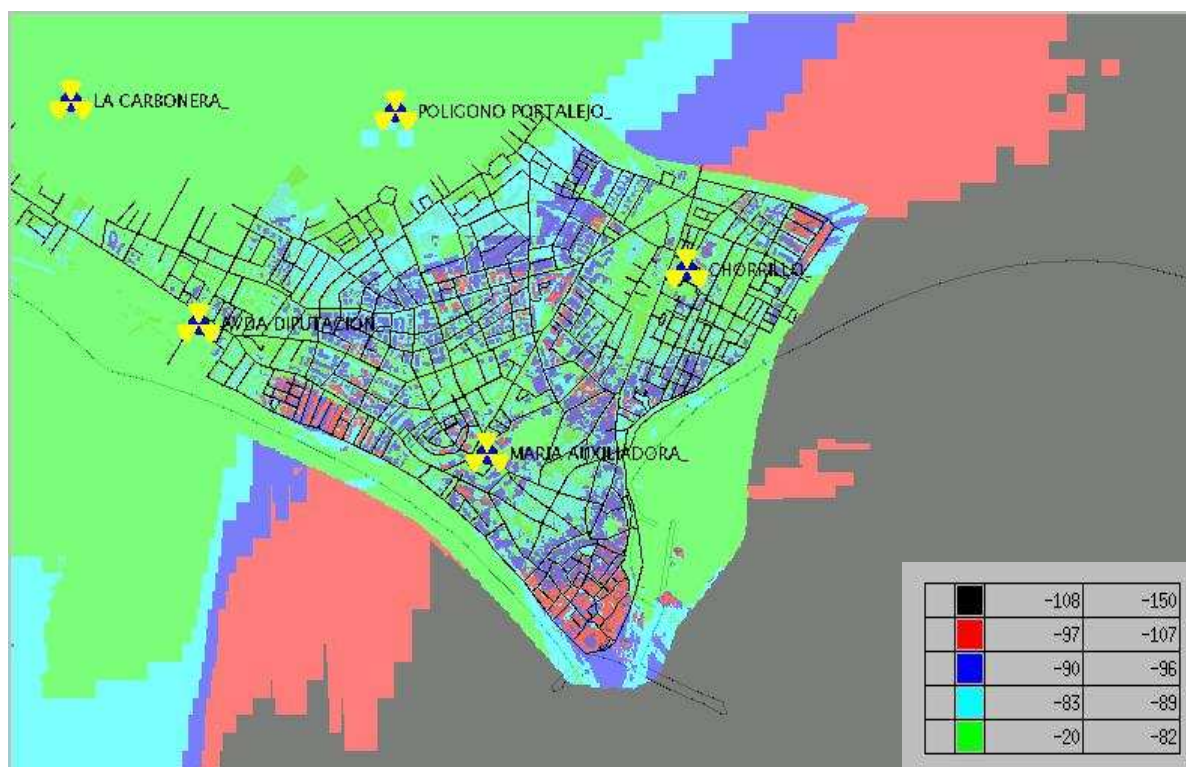


Figura 127. Cobertura. Nivel RSRP en zona cartografía 3D. Fase 0.

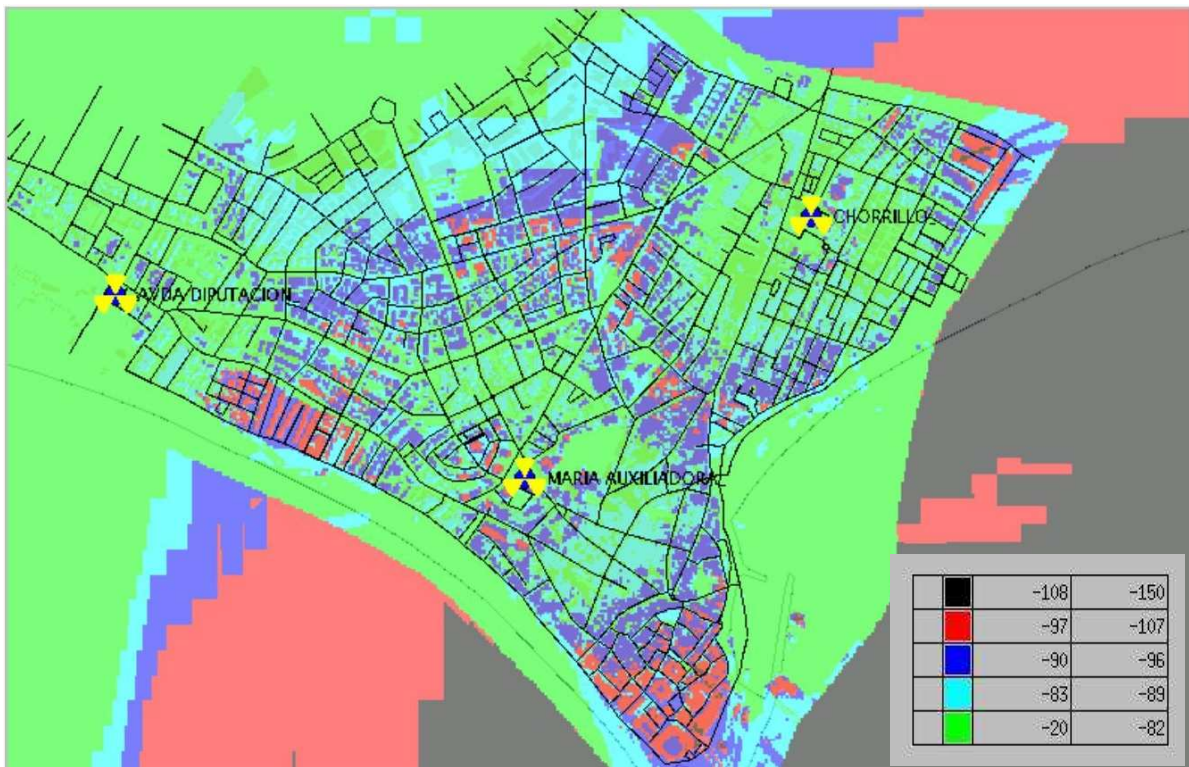


Figura 128. Cobertura. Nivel RSRP en casco urbano. Fase 0

En las siguientes fases se pretenden mejorar los niveles deficientes en cuanto a cobertura se refiere, debido a las manchas rojas y azules.

4.5.2. Fase 1. Densificación en entornos urbanos y extrarradio

En la Fase 1, se han incluido un total de 4 emplazamientos nuevos cuyos datos se detallan a continuación:

NOMBRE DE ESTACIÓN BASE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA EDIFICIO / TORRE
<i>ALMADRABA</i>	36°37'43,92"N	6°23'01,24"O	Torre de 15 m.
<i>PRÍNCIPES</i>	36°37'27,09"N	6°21'47,05"O	Edificio de 31 m.
<i>VIRGEN ANGUSTIAS</i>	36°37'36,03"N	6°21'31,15"O	Edificio de 21 m.
<i>PUERTO NÁUTICO</i>	36°37'00,24"N	6°21,27,73"O	Edificio de 25 m.

Tabla 13. Emplazamientos fase 1

A continuación se muestra las pérdidas que sufre la señal en todo el área de simulación [38]:



Figura 129. Pérdidas de propagación del área de simulación. Fase 1.

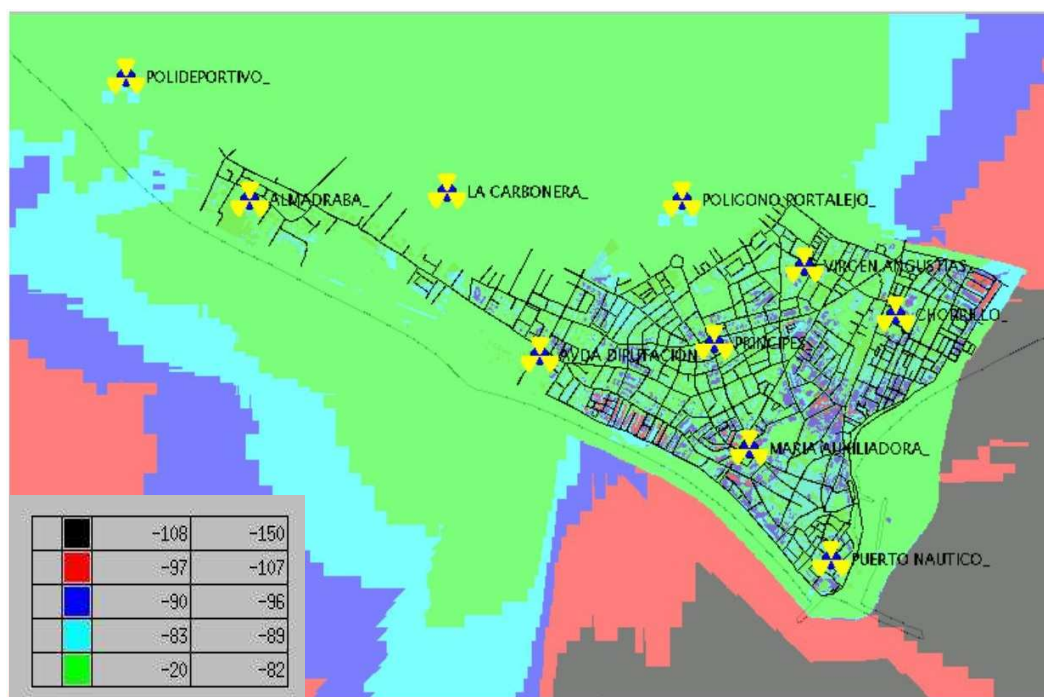


Figura 130. Cobertura. Nivel RSRP esperado área de simulación.

A continuación se muestra la distribución del nivel de EcN0 esperado [38].

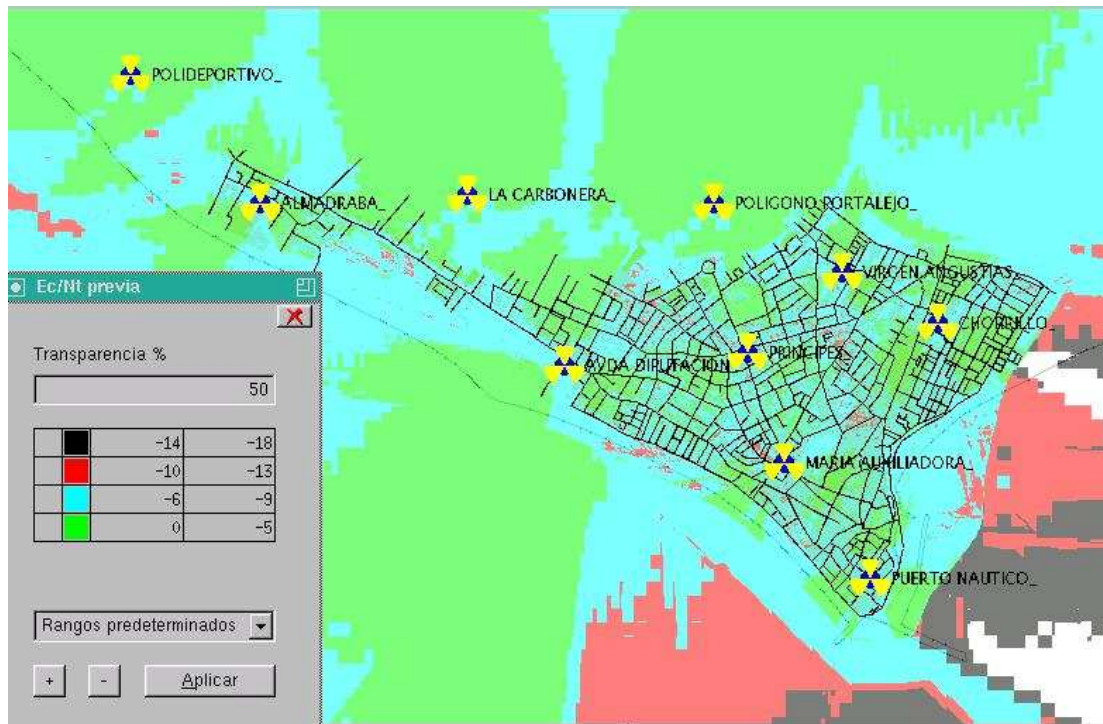


Figura 131. SNR esperado área de simulación

La leyenda para el nivel EcN0 durante el presente capítulo será la siguiente:

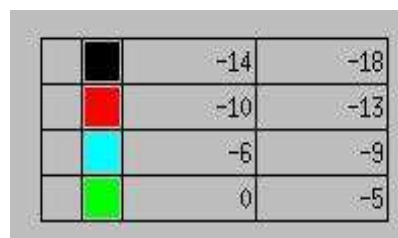


Figura 132. Leyenda EcN0

Tanto el nivel de RSRP teórico como el EcN0 no son los óptimos en muchos puntos de la ciudad, pero se denota que ha mejorado bastante respecto a la fase 0.

En las próximas figuras se observan los niveles de RSRP por zonas para su mejor apreciación [38].

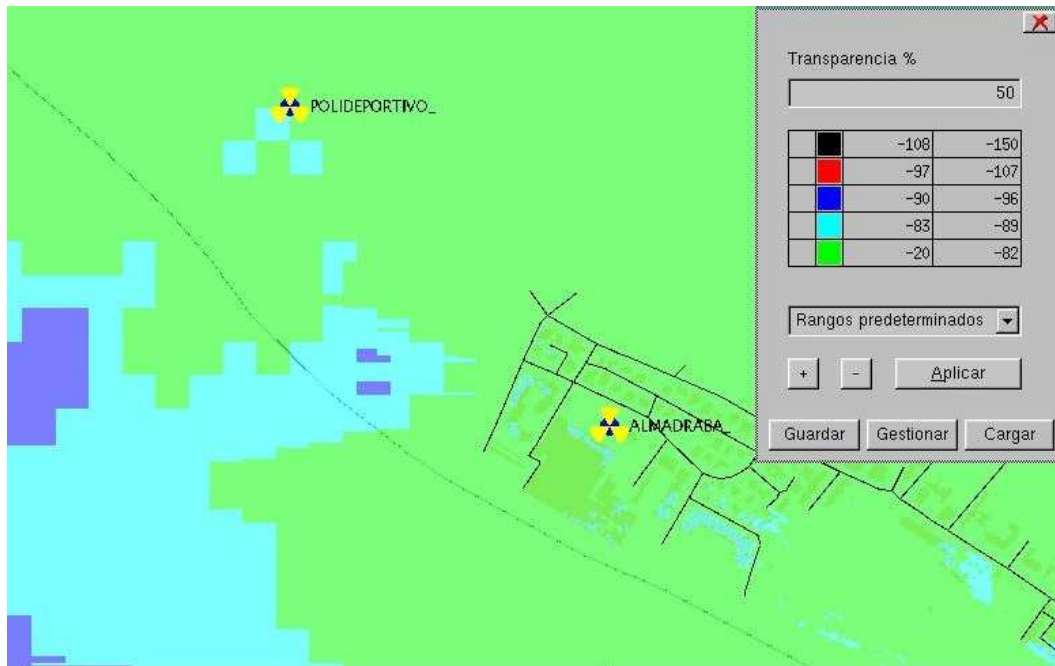


Figura 133. Cobertura. Nivel RSRP zona noroeste.

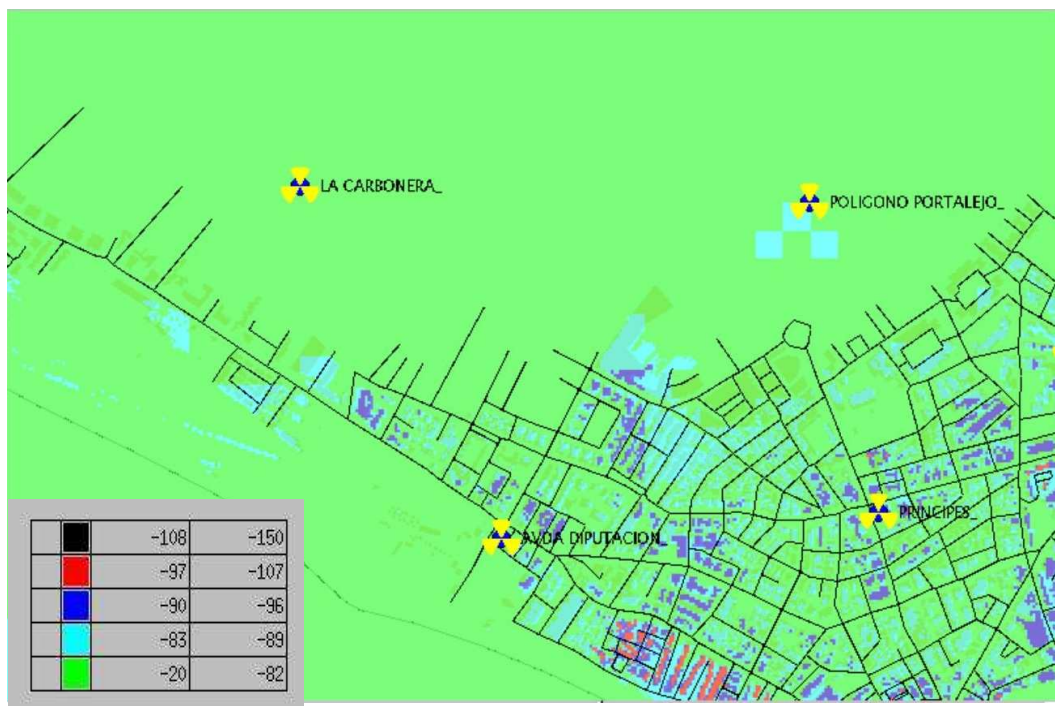


Figura 134. Cobertura. Nivel RSRP zona Oeste de la ciudad.

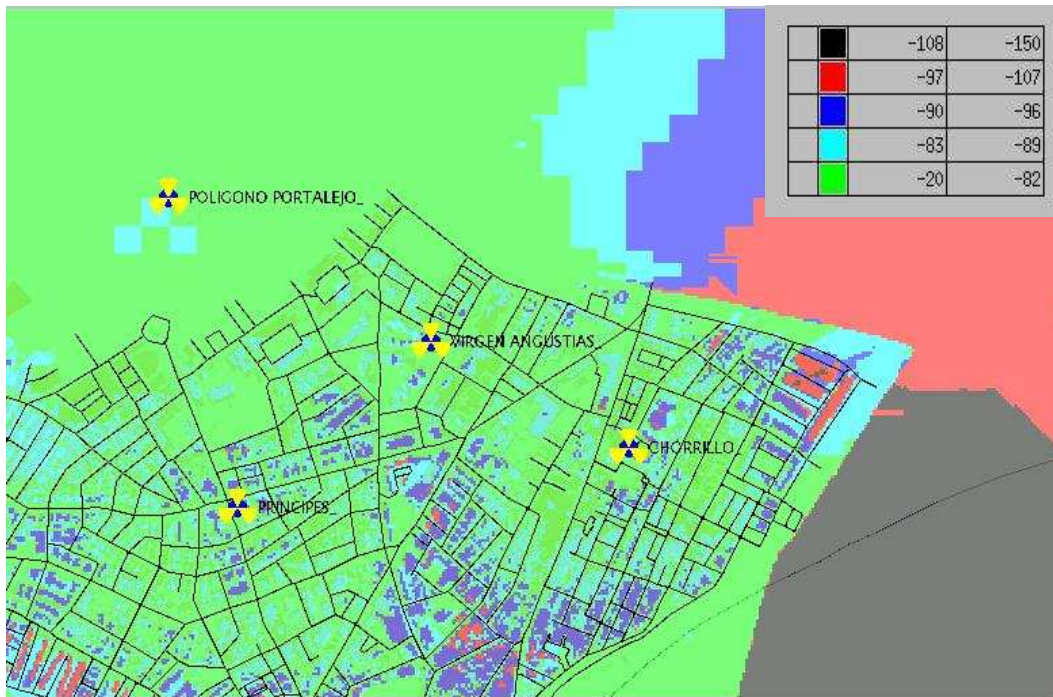


Figura 135. Cobertura. Nivel RSRP zona Norte (casco urbano)

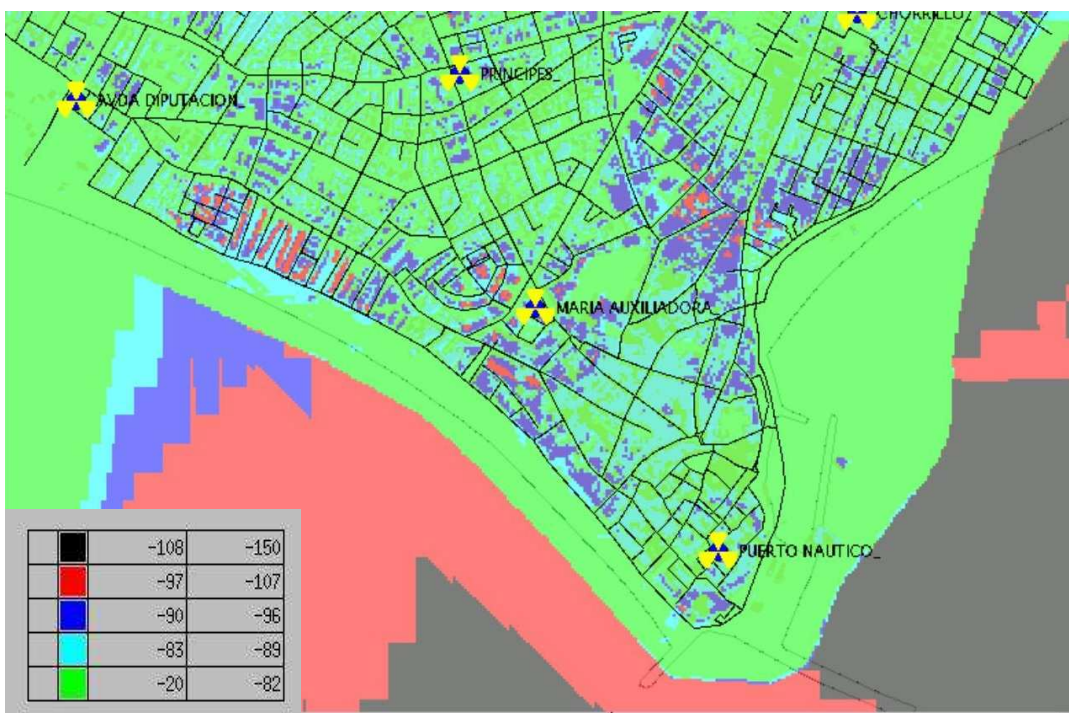


Figura 136. Cobertura. Nivel RSRP zona centro y sur.

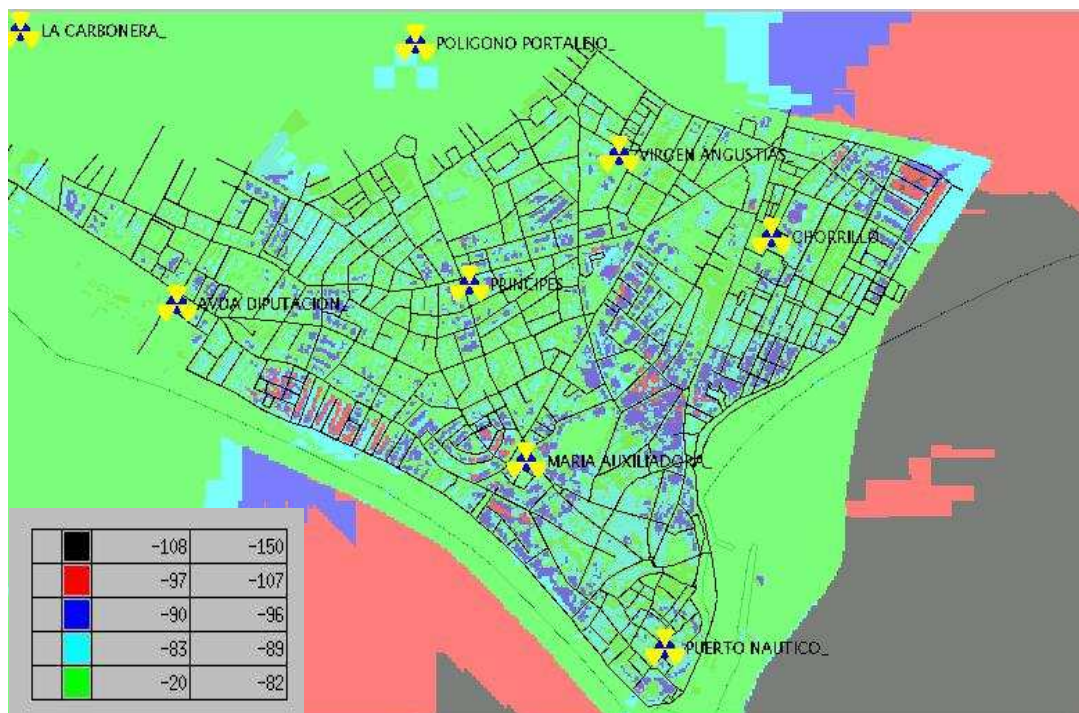


Figura 137. Cobertura. Nivel RSRP casco urbano.

Se puede observar que todavía quedan zonas de huecos de cobertura en las que los niveles rondan los valores de -100 dBm lo que presupone una calidad de servicio mermada precisamente por el pobre nivel de señal recibido.

4.5.3. Fase 2. Subsanación de huecos de cobertura

En la fase 2 se subsanarán la mayor parte de los huecos de cobertura de interiores que se han observado en la fase anterior. Por tanto, en puntos con medida de nivel en el exterior peor de -82 dBm no garantiza el servicio de calidad en el interior.

Para ello, se ha optado por la introducción de 10 emplazamientos nuevos, pudiéndose optar por desdoblar esta fase en otras 2 según el despliegue previsto teniendo en cuenta las inversiones a corto, medio y largo plazo.

Los emplazamientos son los que siguen:

NOMBRE DE ESTACIÓN BASE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA EDIFICIO / TORRE
<i>GUADALETE</i>	36°37'43,92"N	6°23'01,24"O	Torre de 18 m.
<i>AVDA MATEA</i>	36°37'27,09"N	6°21'47,05"O	Torre de 25 m.
<i>AVDA SEVILLA</i>	36°37'36,03"N	6°21'31,15"O	Edificio de 33 m.
<i>LA COSTILLA</i>	36°37'00,24"N	6°21,27,73"O	Edificio de 24 m.
<i>BUENAVISTA</i>	36°37'21,01"N	6°21,31,33"O	Edificio de 23 m.
<i>CALVARIO</i>	36°37'19,54"N	6°21'25,66"O	Edificio de 16

			m.
<i>AMAPOLAS</i>	36°37'22,72"N	6°21'16,72"O	Edificio de 19 m.
<i>BALEARES</i>	36°37'36,49"N	6°21'04,21"O	Torre de 25 m.
<i>FALLA</i>	36°37'27,90"N	6°21'34,59"O	Torre de 25 m.
<i>SANTA MARIA DEL MAR</i>	36°37'02,60"N	6°21'35,74"O	Edificio de 25 m.

Tabla 14. Emplazamientos fase 2

Se ha seleccionado configuraciones en cuanto a orientación de las antenas distinta a la configuración estándar debido fundamentalmente por la ubicación de emplazamientos cercanos al mar y, por tanto, el área de cobertura no comprende el total de los 360° alrededor del emplazamiento.

Por ello, se han tomado configuraciones en forma de "T" para apuntar en las direcciones de la playa o zona costera y el otro sector hacia el interior de la ciudad.

Las configuraciones son las que siguen:

NOMBRE DE ESTACIÓN BASE	ORIENTACIÓN SECTOR 1	ORIENTACIÓN SECTOR 2	ORIENTACIÓN SECTOR 3
<i>GUADALETE</i>	0	120	240
<i>AVDA MATEA</i>	0	120	240
<i>AVDA SEVILLA</i>	25	100	310
<i>LA COSTILLA</i>	30	130	315
<i>BUENAVISTA</i>	0	120	240
<i>CALVARIO</i>	55	170	300
<i>AMAPOLAS</i>	30	230	320
<i>BALEARES</i>	0	120	240
<i>FALLA</i>	0	120	240
<i>SANTA MARIA DEL MAR</i>	35	130	325

Tabla 15. Orientaciones de los emplazamientos fase 3.

A continuación se muestra la pérdida de propagación de la señal con el nuevo despliegue previsto en la fase 2 [38].

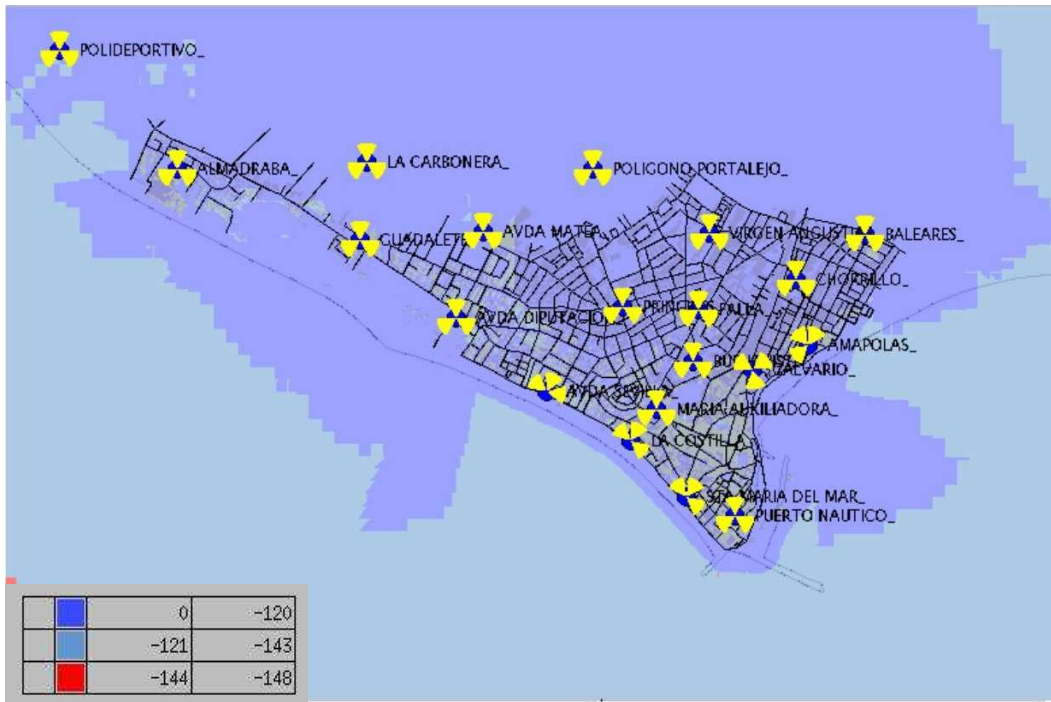


Figura 138. Pérdidas de propagación fase 2

Y la cobertura teórica resulta ser la que sigue [38]:

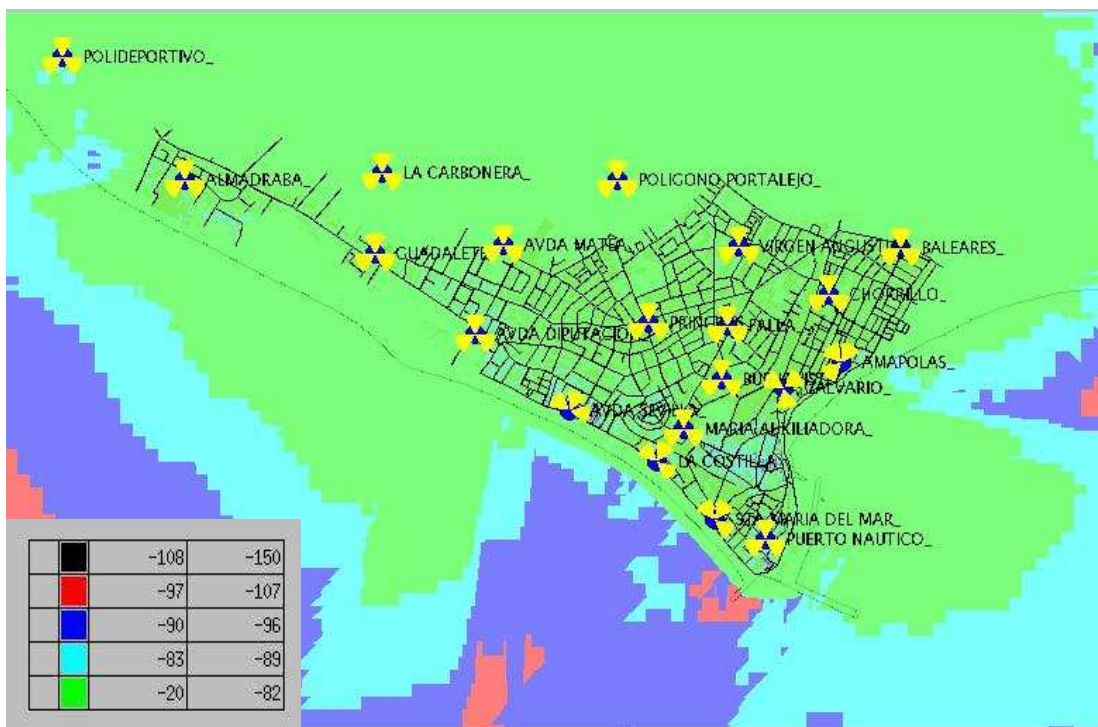


Figura 139. Cobertura ciudad fase 2

Si se muestra por zonas, se aprecia en detalle la mejoría del nivel RSRP en toda la población [38]:



Figura 140. Cobertura ciudad zona noroeste. Fase 2.



Figura 141. Cobertura ciudad zona oeste ciudad. Fase 2.

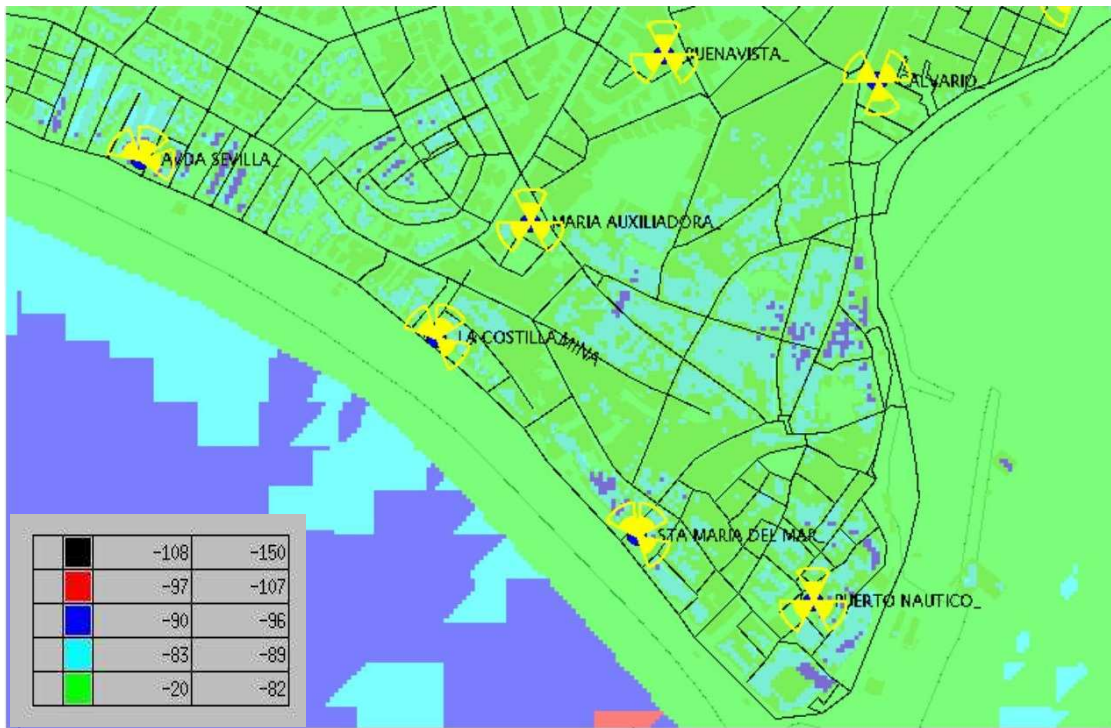


Figura 142. Cobertura zona sur de la ciudad. Fase 2.

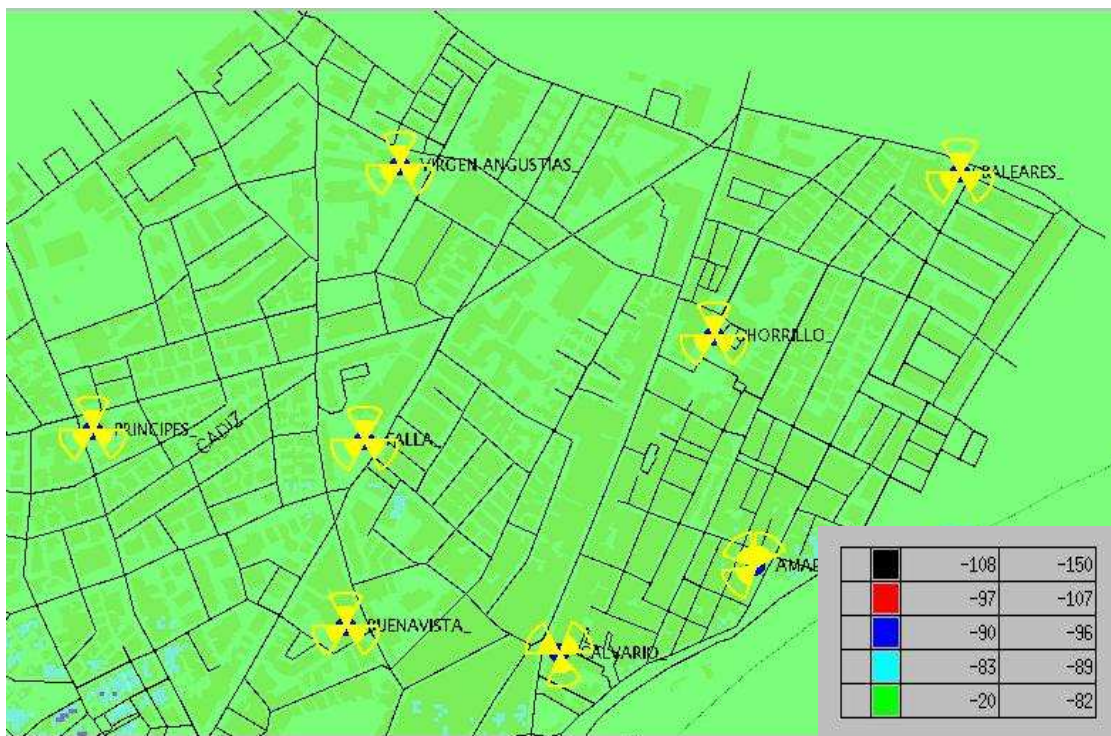


Figura 143. Cobertura zona centro de la ciudad. Fase 2.

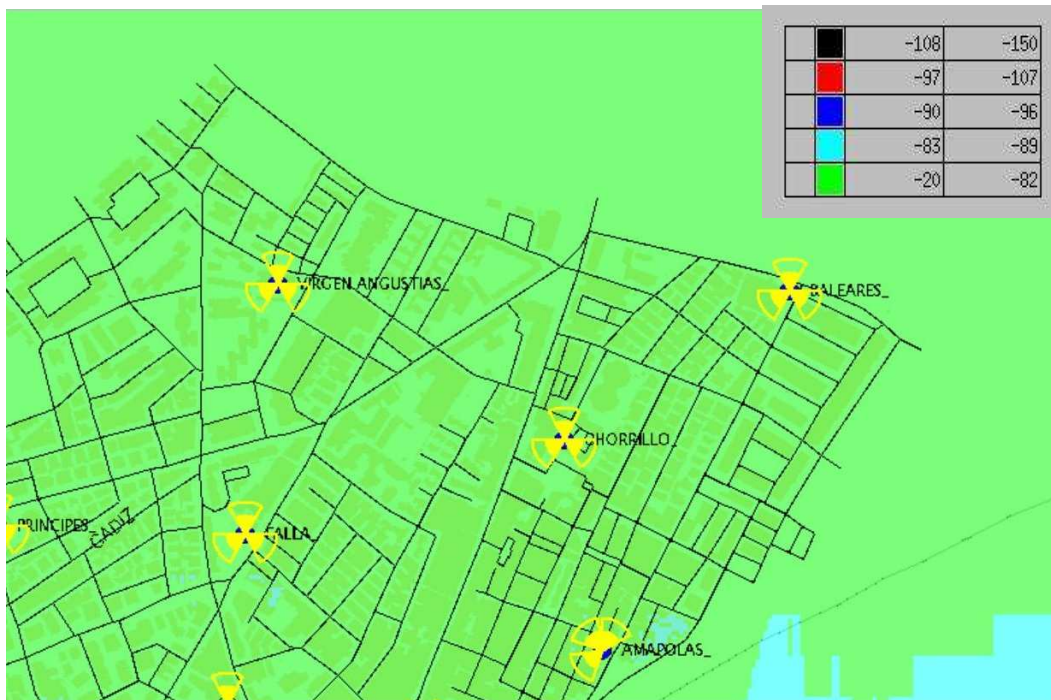


Figura 144. Cobertura zona este de la ciudad. Fase 2.

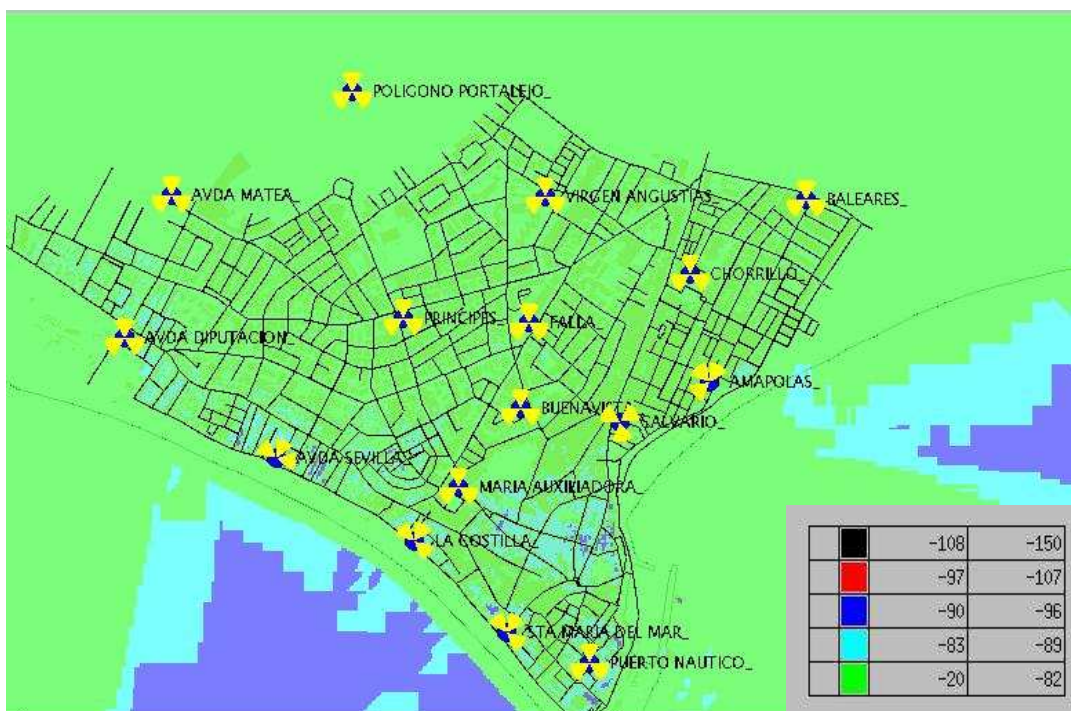


Figura 145. Cobertura ciudad casco urbano. Fase 2.

Se puede apreciar que los niveles de señal esperados son muy buenos en general, por lo que con el planteamiento actual, de la fase 2, la mayor parte de los problemas de cobertura se verán solucionados.

Se observa que las zonas más pobres en cuanto a nivel de señal se encuentran en el casco urbano de la ciudad, como es de esperar, debido a las pérdidas de propagación producidas a causa de los edificios.

A continuación se muestran las imágenes con los problemas detectados [2]:

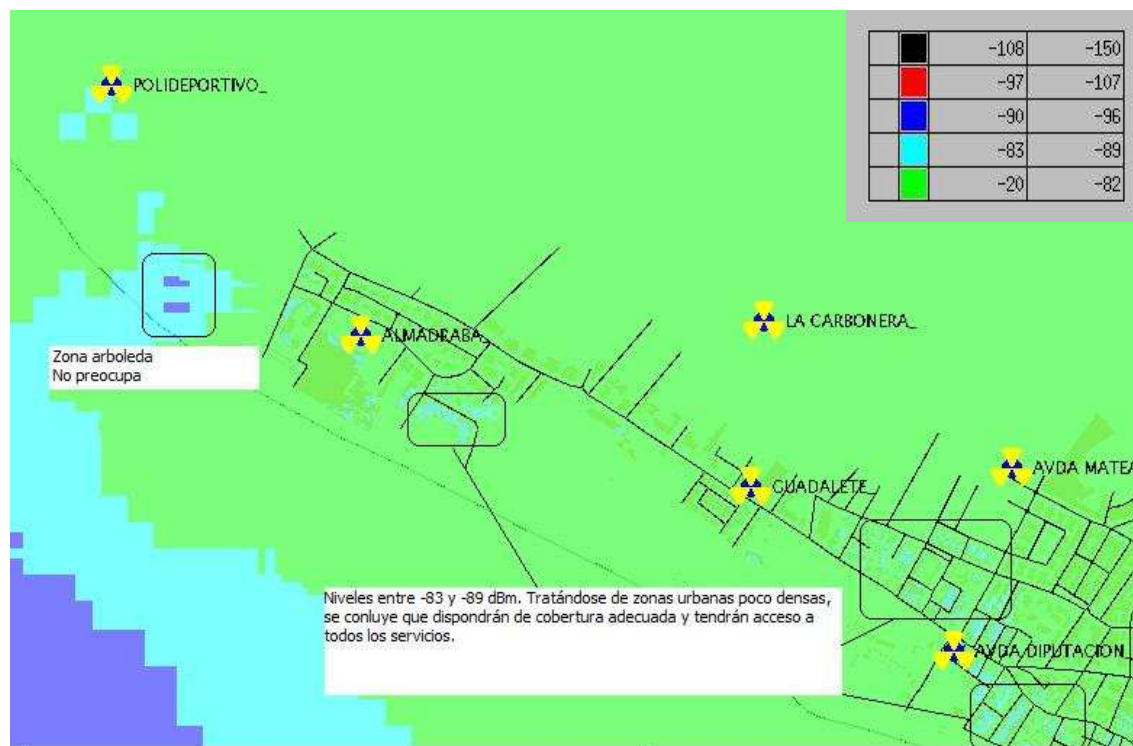
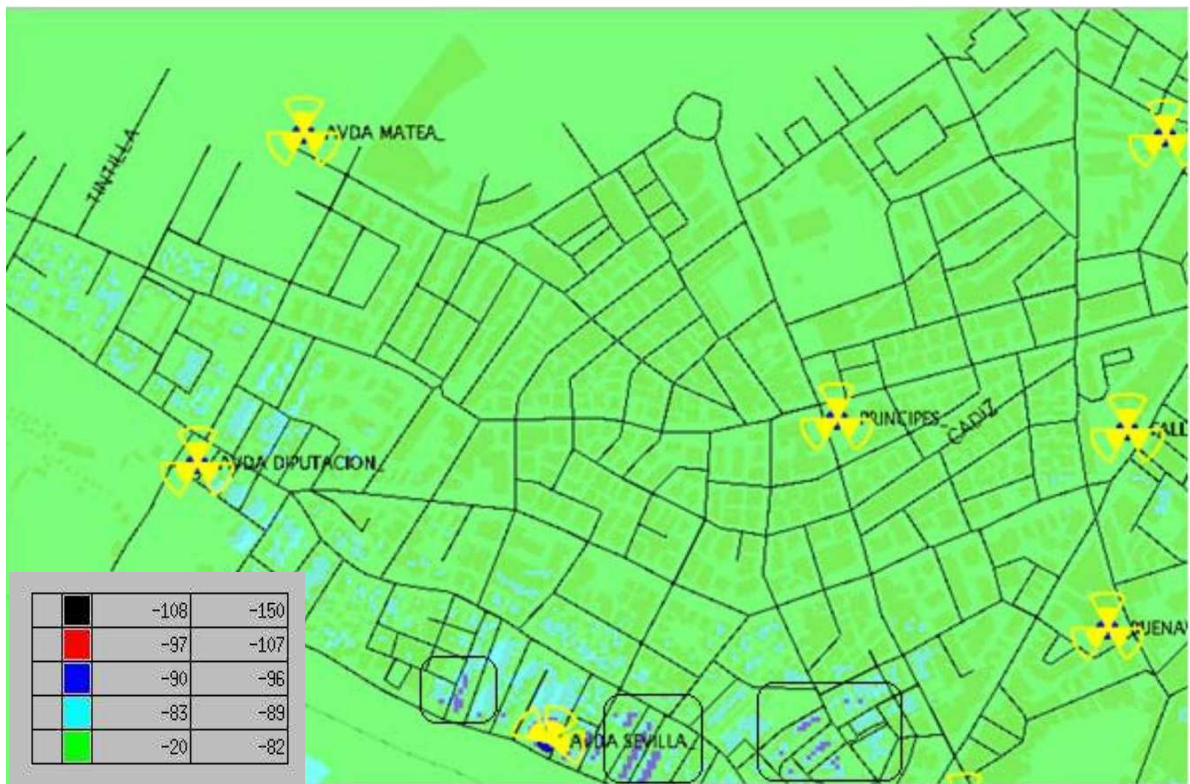


Figura 146. Problemas detectados zona noroeste. Fase 2.



Los niveles azul se encuentran entre -90 y -96 dBm en el interior, por lo que en zonas densas se garantizan cobertura y servicios, aunque pueden quedar zonas en las que las características constructivas de la edificación o la especial ubicación de algunas viviendas, locales o subterráneos hacen no poder garantizarlo al 100%.

Figura 147. Problemas detectados zona oeste de la ciudad. Fase 2.

Además, cabe destacar que en las sucesivas acciones de optimización, se podrá variar la inclinación y orientación de los sectores en los que presumen problemas, tal y como muestra la figura anterior [2].

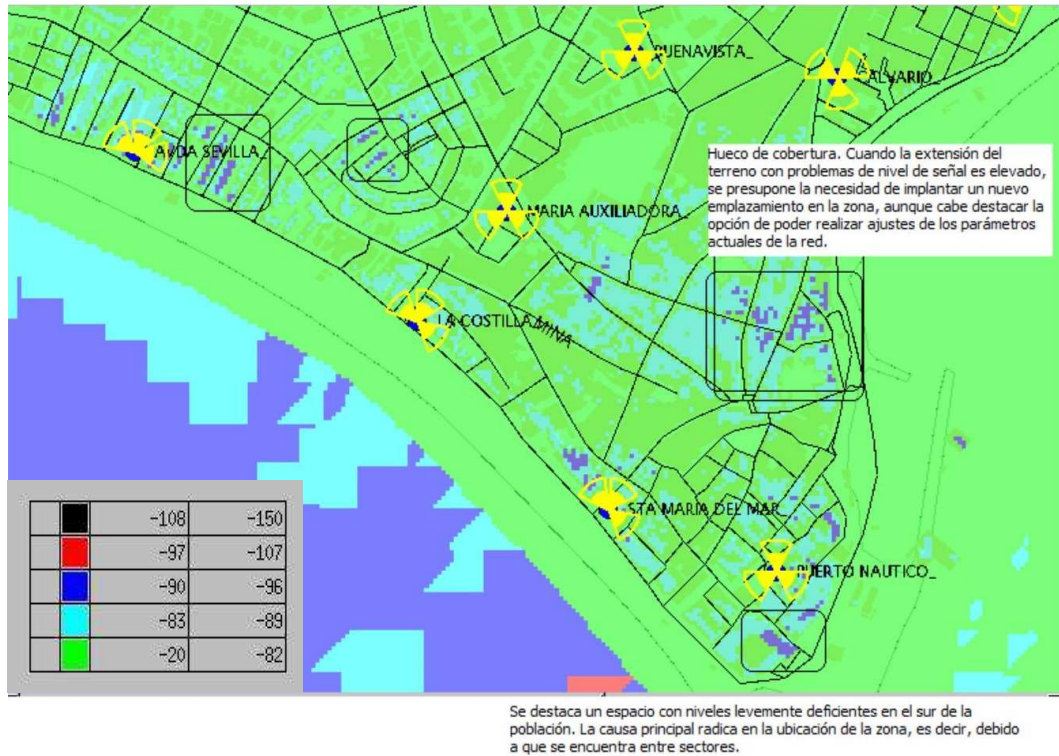


Figura 148. Problemas detectados zona sur de la ciudad. Fase 2.

En la figura 148 se aprecian distintos espacios con niveles deficientes que pueden ser considerados huecos de cobertura: en la parte superior derecha se indica que cuando la extensión del terreno con problemas de nivel de señal es elevado, se presupone la necesidad de implantar un nuevo emplazamiento en la zona, aunque cabe destacar la opción de poder realizar ajustes de los parámetros actuales de la red.

Asimismo, en la parte inferior de la misma figura se destaca un espacio con niveles levemente deficientes en el sur de la población. La causa principal radica en la ubicación de la zona, es decir, debido a que se encuentra entre sector del emplazamiento denominado Puerto Náutico.

A continuación se muestra los niveles EcN0 esperados [2].

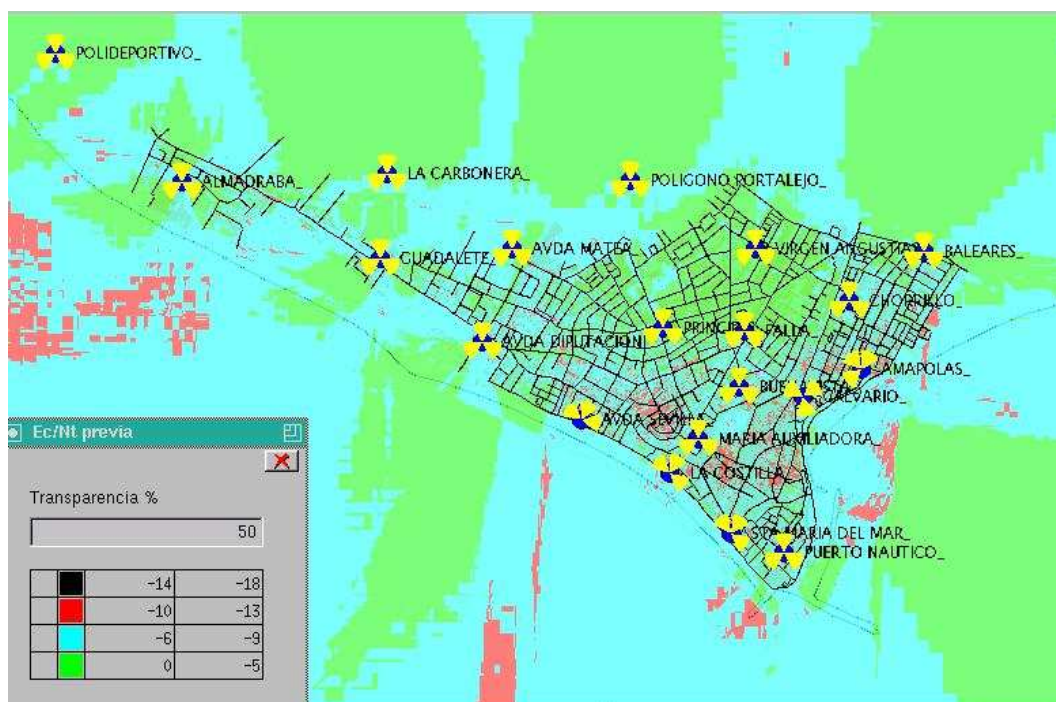


Figura 149. EcN0 en la población. Fase 2.

En la imagen anterior se observan deficiencias en la relación señal a interferencia, por lo que en las zonas con niveles entre -10 y -13 dBm no se garantizan los servicios de banda ancha móvil y, por consiguiente, es preciso la inclusión de un nuevo emplazamiento, siempre que el departamento de optimización no pueda solucionarlo mediante reajustes en los emplazamientos existentes.

Las configuraciones finales en cuanto a orientaciones se refiere es la que sigue:

NOMBRE DE ESTACIÓN BASE	FASE	ORIENTACIÓN SECTOR 1	ORIENTACIÓN SECTOR 2	ORIENTACIÓN SECTOR 3	ALTURA
<i>POLIDEPORTIVO</i>	0	0	120	240	25 m
<i>LA CARBONERA</i>	0	0	120	240	25 m
<i>POLIGONO PORTALEJO</i>	0	0	120	240	25 m
<i>AVDA DIPUTACIÓN</i>	0	0	120	240	25 m
<i>CHORRILLO</i>	0	0	120	240	26 m
<i>MARÍA AUXILIADORA</i>	0	0	120	240	35 m
<i>ALMADRABA</i>	1	0	120	240	15 m
<i>PRÍNCIPES</i>	1	0	120	240	31 m
<i>VIRGEN ANGUSTIAS</i>	1	0	120	240	21 m
<i>PUERTO NÁUTICO</i>	1	0	120	240	25 m
<i>GUADALETE</i>	2	0	120	240	18 m
<i>AVDA MATEA</i>	2	0	120	240	25 m

<i>AVDA SEVILLA</i>	2		25	100	310	33 m
<i>LA COSTILLA</i>	2		30	130	315	24 m
<i>BUENAVISTA</i>	2		0	120	240	23 m
<i>CALVARIO</i>	2		55	170	300	16 m
<i>AMAPOLAS</i>	2		30	230	320	19 m
<i>BALEARES</i>	2		0	120	240	25 m
<i>FALLA</i>	2		0	120	240	25 m
<i>SANTA MARIA DEL MAR</i>	2		35	130	325	25 m

Tabla 16. Emplazamientos y configuraciones

4.5.4. Fase 3. Peticiones singulares

Cuando existan peticiones singulares de clientes con problemas de cobertura se les podrá atender, siempre con el visto bueno del departamento comercial y tras su análisis para definir su conveniencia estratégica o debido a que el cliente sea tratado como de gran nivel para el operador.

En estas situaciones, se puede optar por instalar un repetidor de baja ganancia en "casa del cliente" y con esto solucionar sus problemas.

Un repetidor LTE sirve para extender el servicio a través de una antena transmisora en un área dónde antes no había servicio con calidad suficiente, colocando para ello la antena donante en zonas donde hay buen nivel y buena calidad (normalmente en el exterior del edificio).

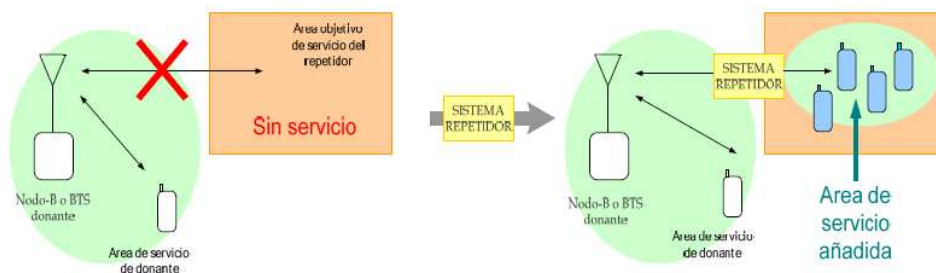


Figura 150. Aplicación de un sistema repetidor LTE

Con este tipo de soluciones se extiende el área de servicio y aumenta la capacidad de la célula donante al disminuir la pérdida de enlace hacia lugares con demanda.

El aumento de la capacidad neta puede significar una reducción de la superficie del área de servicio de la célula donante.

Un pico-repetidor LTE es un equipo repetidor LTE que se caracteriza por [39]:

- Potencia de salida en torno a 13dBm.

- Ganancia máxima del repetidor en torno a 60dB.

Las áreas objetivo de servicio típicas para un sistema pico-repetidor deben tener las siguientes características:

- Pérdida de propagación lo bastante pequeña para cumplir condiciones de servicio. El valor concreto depende de la ganancia de funcionamiento del pico-repetidor.
- Demanda de tráfico reducida (< 10%) frente a la cursada por la célula donante.

Debido a la pérdida de propagación admitida y otras limitaciones técnicas de los equipos pico-repetidores, estos se consideran apropiados para la cobertura de:

- Interior de edificio con superficie entre 100m² y 500 m².
- Zona abierta de reducidas dimensiones. En estos casos, las instancias de aplicación de un pico-repetidor con antena donante son muy inusuales, y podrían limitarse a pequeñas zonas abiertas con buen nivel pero mala calidad por sobrealcances.

Antes de optar por la instalación de un repetidor de estas características deberá realizarse un análisis pormenorizado sobre la conveniencia o no, tanto económica de cara al departamento comercial como técnica para no perjudicar a la red y, por tanto, a los demás usuarios.

4.6. Optimización de la red

Una vez diseñada e implementada la red con la puesta en servicio de los emplazamientos contratados, se procede a la optimización de la red LTE en base a varios criterios como pueden ser los que siguen:

- Capacidad Hardware
- Capacidad del enlace Radio
- Interferencias debido a sobrealcances
- Parámetros de ajuste específicos
- Configuraciones adecuadas

Existen varios factores que limitan la capacidad de una célula LTE, entendida como la capacidad de cursar simultáneamente un número determinado de conexiones.

Para calcular el número de celdas y/o estaciones base necesarias se deben tener en cuenta diversos factores como son:

- Número de usuarios.
- Densidad de usuarios.

- Modelo de tráfico empleado para el estudio.
- Volumen de datos de los usuarios en hora cargada.

Con los cuatro puntos mencionados se puede calcular el tráfico total y teniendo en cuenta la capacidad de una estación base se calcula el número de estaciones que son necesarias para ofrecer dicho tráfico.

Por otro lado, cada estación base tiene un área de cobertura y en función del área objeto de estudio se obtiene el número de estaciones para cubrir la zona.

Si se expresa gráficamente:

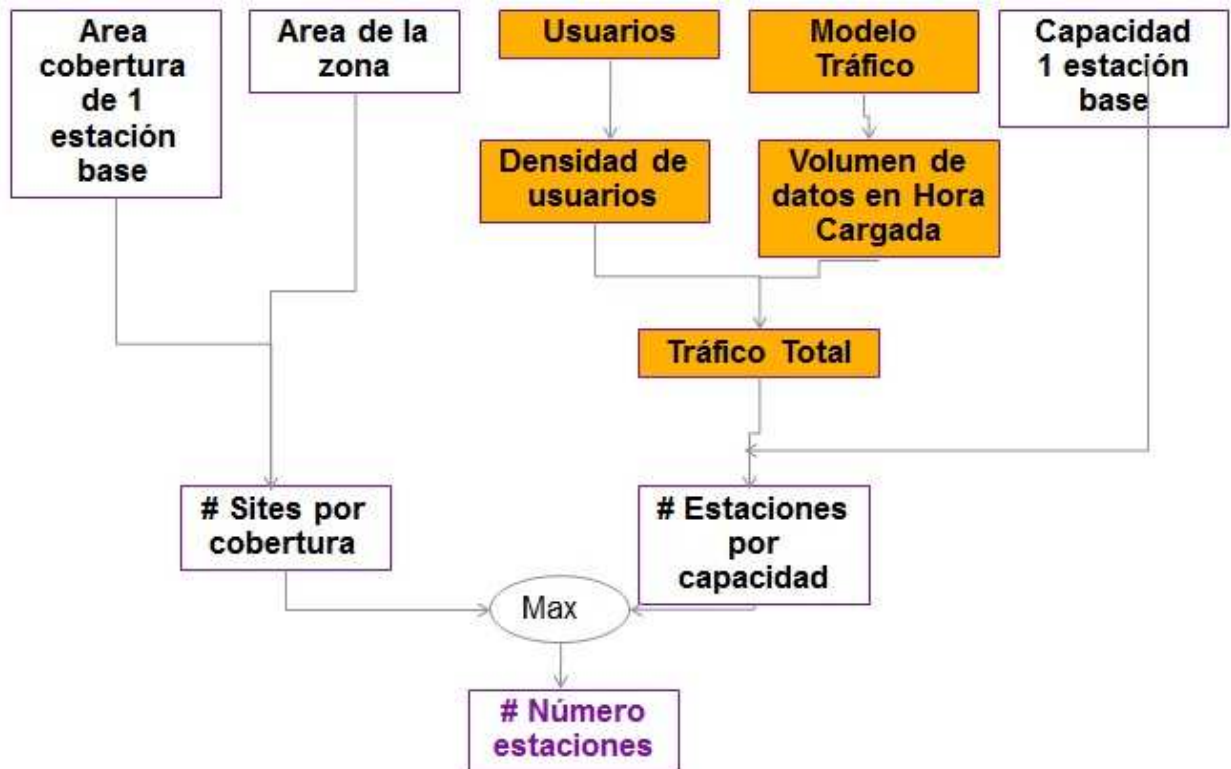


Figura 151. Cálculo de capacidad por área y tráfico

4.6.1. Dimensionado en banda base

La capacidad hardware banda base de algunos fabricantes reside en los módulos de sistema, y normalmente existen módulos de sistema con distintas capacidades.

A continuación se muestra a modo de ejemplo el equipamiento hardware de uno de los mayores fabricantes de tecnología LTE a nivel mundial (NSN) [40].



Figura 152. Ejemplo de instalación con equipos NSN

Cada estación base debe contar al menos con un módulo de sistema y un módulo RF [4]:




<p>Flexi RF Module</p> <ul style="list-style-type: none"> - each RF module supports up to 3 sectors - 1+1+1 LTE or 2+2+2 WCDMA with only one RF Module - Support for Distributed site up to 20 km from System Module - 3 x 60 W at the antenna connector 	
OR	
<p>Remote Radio Head (RRH)</p> <ul style="list-style-type: none"> - each RRH supports a single sector - Supports MIMO (2Tx/2Rx): - Up to 40W + 40 W at antenna connector 	
WITH	
<p>Flexi System Module</p> <ul style="list-style-type: none"> - provides baseband processing capability - provides interface to transport network 	

Figura 153. Ejemplo de módulo de sistema y módulo RF de NSN

A modo de ejemplo se muestra la capacidad del módulo de sistema FSME de NSN [4]:

Bandwidth	Max MCS	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
# of cells	-	6	6	3	3
Peak L1 DL Throughput per cell	28	37 Mbit/s	75 Mbit/s	110 Mbit/s	150 Mbit/s
Peak L1 UL Throughput per cell (PUSCH, MCS 24)	24	10,07 Mbit/s (20PRBs)	25,7 Mbit/s (48 PRBs)	39,2 Mbit/s (72 PRBs)	51,0 Mbit/s (96 PRBs)

Tabla 17. Throughput DL / UL

Bandwidth	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Max number of active users per cell (FSME) RL10	200	400	-	800
Max number of active users per cell (FSME) RL20	480	600	720	840
Max number of active users per cell (FSME) RL30 (3 sectors/site)	480	600	720	840
Max number of active users per cell (FSME) RL30 (6 sectors/site)	420	420	-	-

Tabla 18. Máximo número de usuarios simultáneos

4.6.2. Capacidad de celda

La capacidad de una celda en LTE depende, entre otros, de diversos parámetros:

- Rango de celda: que tiene en cuenta las pérdidas de propagación. También es conocido como una variación del ISD (*Inter Site Distance*).

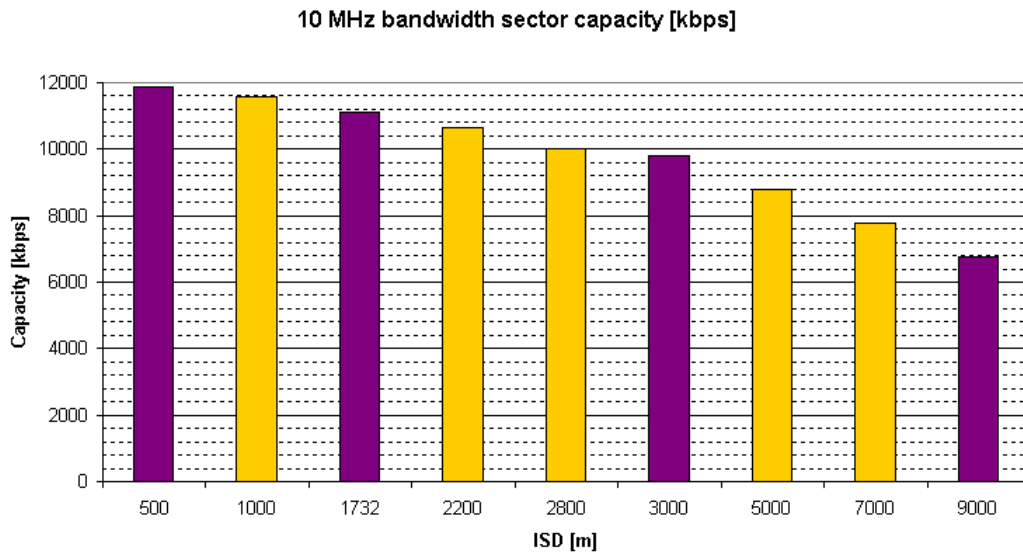


Figura 154. Efecto del ISD en la capacidad de una celda

Como se aprecia, a medida que aumenta la interdistancia entre estaciones base, es decir, cuanto mayor sea la distancia entre dos estaciones contiguas, la capacidad de la celda se ve reducida.

Asimismo, la distribución de la relación SNR es peor en celdas con un ISD elevado, por lo que se ve más limitado debido al ruido.

A continuación se muestra una gráfica que relaciona la velocidad de descarga en sentido descendente con el rango de la celda. A mayor celda menor *throughput* [40].

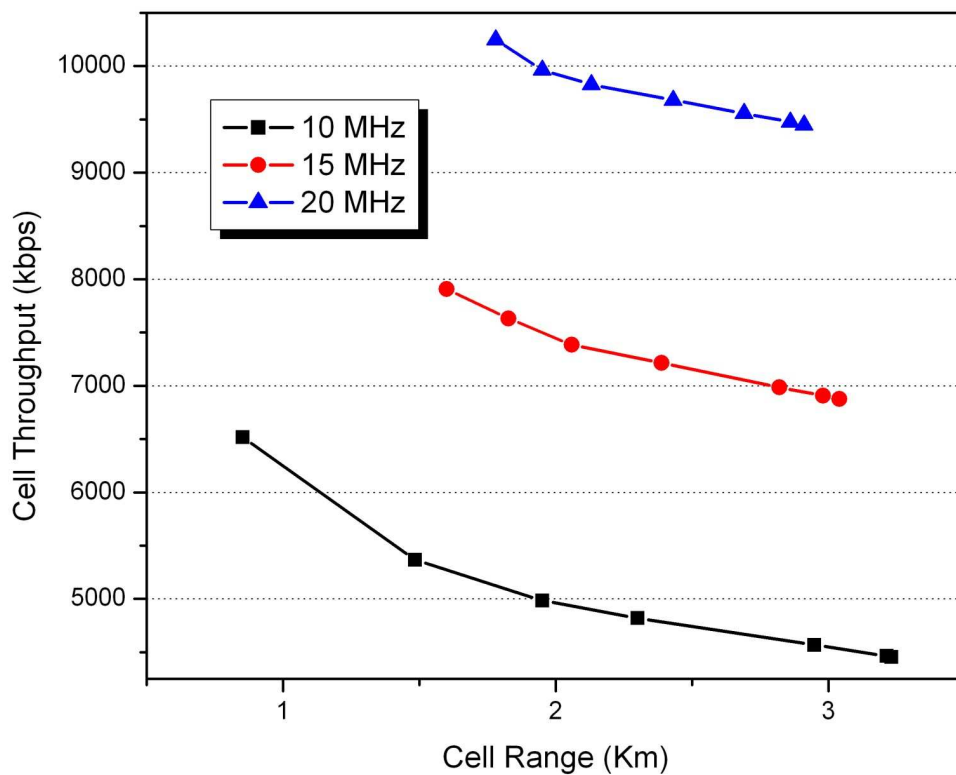


Figura 155. Cell Throughput en función del rango de celda

- Ancho de banda de canal: entre 1,4 y 20 MHz por canal. Como es lógico, la mayor eficiencia desde el punto de vista de la capacidad se consigue con un mayor ancho de banda.

Es especialmente importante, la sobrecarga para bandas estrechas, ya que la señalización ocupa un porcentaje mayor en esos casos.

En el siguiente gráfico se aprecia la eficiencia espectral para distintos anchos de banda [40]:

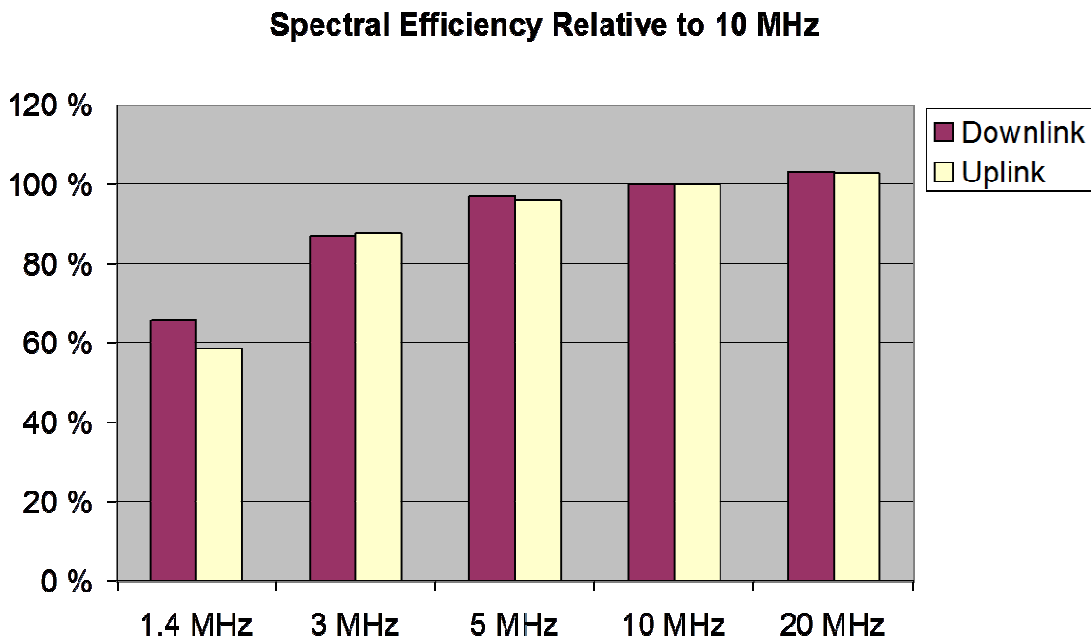


Figura 156. Eficiencia espectral en función del ancho de banda

- Carga de la celda: el impacto que tiene el porcentaje de carga de una celda concreta en la capacidad se basa en resultados de simulaciones.

Debido precisamente a estas simulaciones, el efecto de la carga de la celda en la capacidad de la misma, se puede resumir en un factor de escala que depende de la carga y de la interdistancia entre estaciones base. A modo de ejemplo, una simulación es la que se muestra a continuación [41]:

La fórmula que tiene en cuenta este factor de escala es la que sigue,

$$Capacidad = Capacidad\ 100\% \cdot Carga \cdot Factor_Escala_Carga$$

Donde el parámetro *Factor_escal*_{Carga} se obtiene de la tabla que tiene en cuenta además la interdistancia.

Cell load	ISD [m]			
	500	1732	3000	9000
0%	2.16626	1.62764	1.10093	1.00000
5%	2.16066	1.44323	1.08776	1.00000
10%	2.06931	1.25882	1.07534	1.00000
15%	1.96264	1.17161	1.06411	1.00000
20%	1.85962	1.08440	1.05348	1.00000
25%	1.76386	1.06594	1.04404	1.00000
30%	1.67264	1.04748	1.03535	1.00000
35%	1.58825	1.03966	1.02778	1.00000
40%	1.50839	1.03257	1.02096	1.00000
45%	1.43581	1.02117	1.01533	1.00000
50%	1.36686	1.01303	1.01030	1.00000
55%	1.30518	1.00977	1.00647	1.00000
60%	1.24805	1.00651	1.00338	1.00000
65%	1.19773	1.00489	1.00141	1.00000
70%	1.15196	1.00326	1.00019	1.00000
75%	1.11345	1.00163	1.00000	1.00000
80%	1.07858	1.00000	1.00000	1.00000
85%	1.05099	1.00000	1.00000	1.00000
90%	1.02793	1.00000	1.00000	1.00000
95%	1.01169	1.00000	1.00000	1.00000
100%	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Tabla 19. Factor de escala debido a carga de celda

- Ganancia de MIMO: el hecho de utilizar MIMO reporta un beneficio en cuanto a capacidad de la celda. De esta forma, al emplear MIMO se puede obtener una ganancia asociada.

4.6.3. Dimensionamiento Radio

En la parte radio, existen varios recursos que limitan el máximo número de conexiones que se pueden cursar en una célula:

- Recursos Radio: Los distintos Resource Blocks que se asignan a cada usuario son recursos limitados.
- Potencia transmitida.
- Interferencia.

El control de admisión radio actúa como limitador para evitar que se agoten los recursos radio, denegando la entrada de nuevas conexiones cuando alguno de los recursos anteriormente mencionados está próximo a agotarse.

Si, a pesar de todo, se llega a saturación, entraría en funcionamiento el control de congestión, que libera conexiones hasta que la carga vuelve a los límites normales.

4.6.3.1. Asignación de recursos radio

Tal y como ya se ha visto en el capítulo 2, los recursos radio son limitados. En la siguiente figura se aprecia la asignación de usuarios en el enlace ascendente donde la zona sombreada no se ha asignado a ningún usuario [41]:

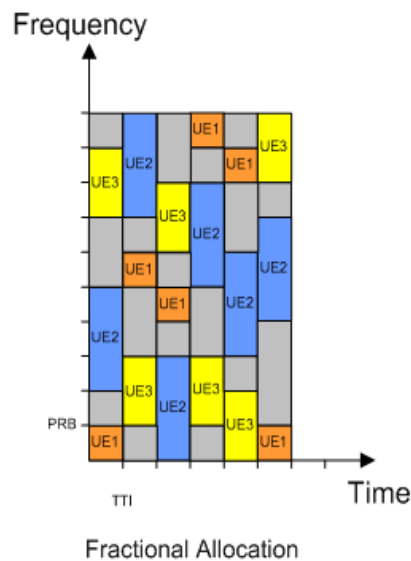


Figura 157. Asignación de recursos en UL.

4.6.3.2. Potencia transmitida

La potencia transmitida es la misma para cada PRB (Physical Resource Block) en *downlink* y, se aplica un offset a los PRBs que contienen canales especiales o las señales de referencia (RS).

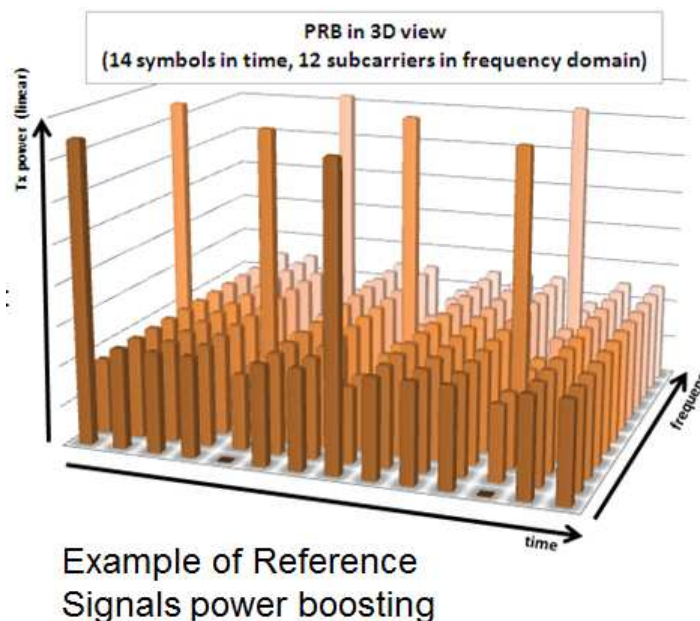


Figura 158. Potencia de transmisión con offset en RS

En *uplink* sin embargo hay un control de potencia que tienen dos esquemas de funcionamiento distintos:

- 1) Esquema convencional: cuando se intenta mantener una SINR constante en el receptor. El terminal de usuario aumenta la potencia para compensar las pérdidas de propagación.
- 2) Esquema fraccional: se permite una disminución de SINR cuando las pérdidas de propagación aumentan. El terminal de usuario aumenta la potencia para compensar parcialmente las pérdidas de propagación. El objetivo es aumentar la eficiencia del interfaz aire e incrementar el *throughput* medio reduciendo la interferencia inter-celda.

4.6.3.3. Margen de Interferencia (IM)

El margen de interferencia se define como la relación entre las señales recibidas con y sin interferencia:

$$IM = \frac{S / N}{S / (I_{own} + I_{other} + N)}$$

Donde S es la señal de interés

N es la potencia de ruido

I own es la interferencia de la propia celda

I other es la interferencia de otras celdas

La interferencia propia es prácticamente cero debido a la propiedad de ortogonalidad de las subportadoras.

A continuación se muestra el margen de interferencia permitido para ciertas velocidades de descarga, en función de la carga de la celda:

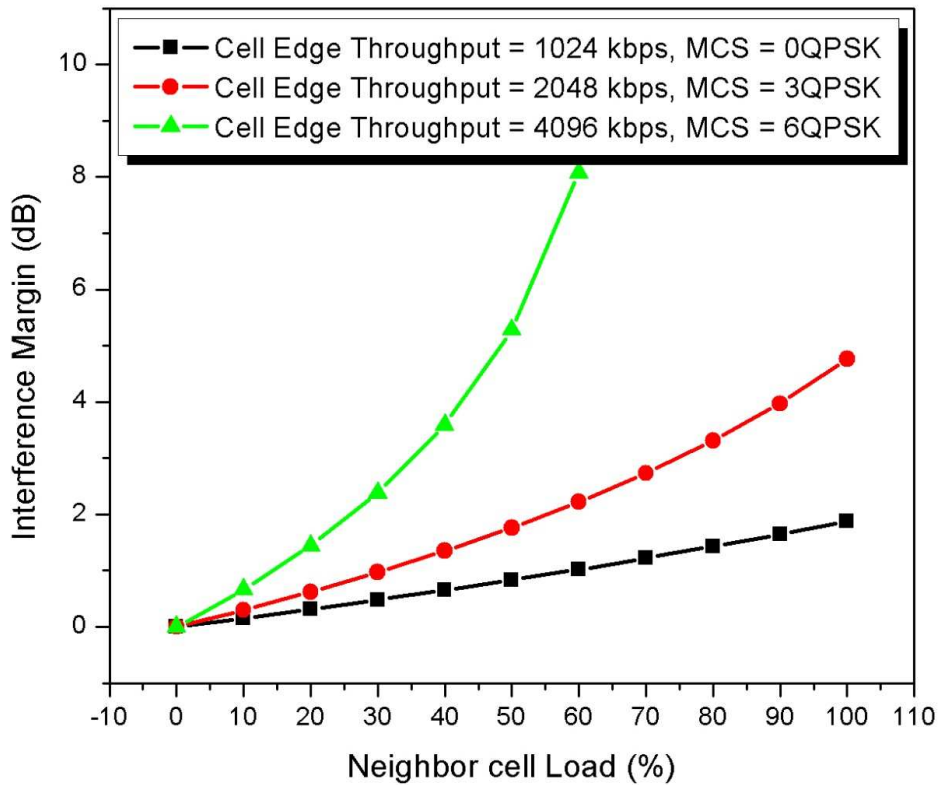


Figura 159. Margen de Interferencia en función de la carga en DL

El margen de interferencia en UL es difícil de obtener debido a la característica no determinística del enlace ascendente. Si se representa también en función de la carga de la celda, un ejemplo puede ser:

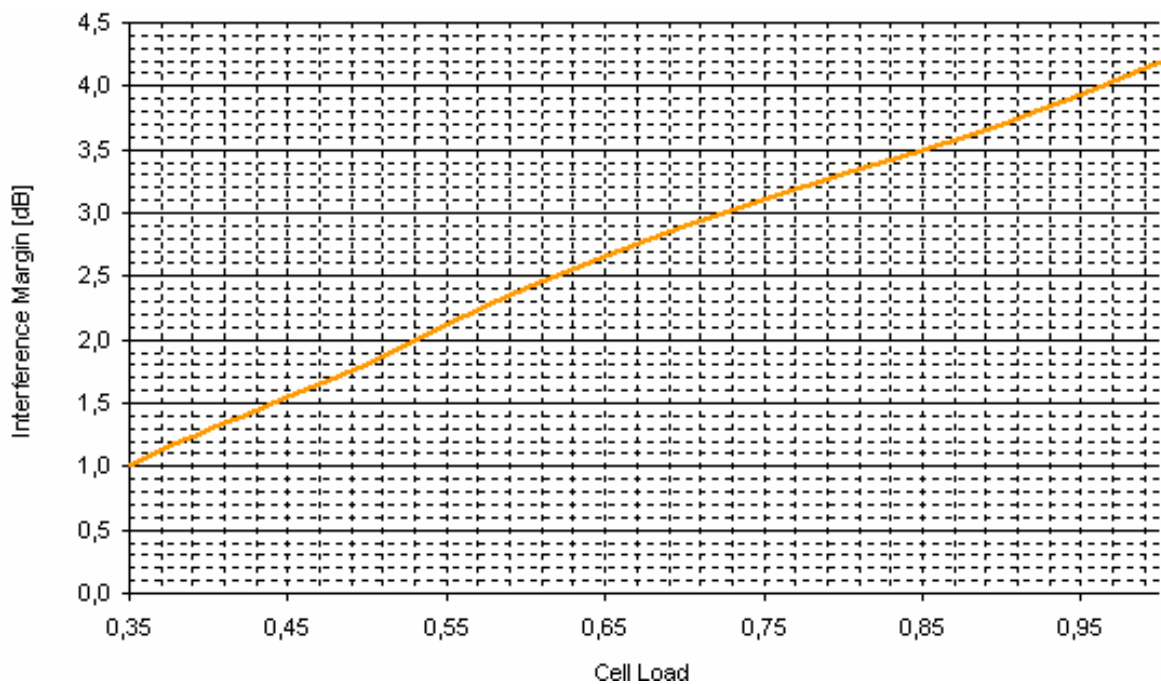


Figura 160. Ejemplo Margen de Interferencia en UL

4.6.4. Optimización de la red en zonas de alta densidad de eNodos B

La optimización de cobertura en LTE es muy importante, en particular, en zonas de alta densidad de eNodos B. En GSM se disponen de mecanismos para tratar de minimizar las interferencias entre estaciones base (planificación de frecuencias, frequency hopping...) pero en LTE, al utilizar la misma frecuencia todos los enodos B (macrocélulas), cobra especial importancia la optimización de los sistemas radiantes (orientación, inclinaciones, etc). Así mismo, también es importante utilizar antenas con diagramas de radiación adecuados.

La optimización de cobertura se puede hacer a partir de medidas ayudados por la herramienta de planificación. A continuación se expone un proceso para el ajuste de inclinaciones cuando se introducen nuevos emplazamientos en la red utilizando las herramientas disponibles en este momento (medidas de cobertura, herramientas de simulación).

4.6.4.1. Importancia del ajuste de inclinaciones y listas de vecinas en LTE

En LTE la planificación y la optimización están fuertemente relacionadas:

- En el enlace descendente, la potencia de transmisión es limitada. Cuanto mayor sea el nivel de interferencia en la célula, mayor será la potencia que necesitará cada usuario y menor será, por tanto, la capacidad de la célula.
- En el enlace ascendente, cuanto mayor sea la interferencia presente en la célula, mayor será la potencia con la que ha de transmitir el móvil con el consiguiente perjuicio en la capacidad y cobertura de la misma.

Por tanto, es necesario optimizar el área de cobertura de cada célula de forma que no provoquen excesiva interferencia en las demás. En zonas de alta densificación donde la distancia entre emplazamientos es pequeña la optimización de cobertura será especialmente importante. A continuación se comentan algunos aspectos a tener en cuenta.

4.6.4.1.1. Definición de colindancias

A diferencia con el sistema UMTS en el que si se recibe un buen nivel de señal de una célula que no está en la lista de vecinas de ninguna de las células que están en ese momento en el Active Set (registro de celdas vecinas), el móvil no podrá realizar soft handover a esa célula que, por lo tanto, contribuye a elevar el nivel de interferencia en esa zona pudiendo incluso llegar a tirar la llamada. Por ello es necesario realizar una correcta definición de colindancias.

Para LTE es bien distinto, ya que el eNodo-B se autoconfigura y es capaz de saber qué celda es vecina ya que existe un enlace entre ellas.

4.6.4.1.2. Sobrealcances

Los sobrealcances de células en zonas lejanas a las mismas pueden provocar varios problemas:

- Si la señal del sobrealcance es suficientemente fuerte o no hay otro servidor dominante el móvil se conectará a ella.
- Fluctuaciones de la señal que provocan excesivos trasposos.
- Potencia alta de transmisión del móvil con perjuicio en la capacidad de la célula.
- Mala cobertura de la célula con sobrealcance en zonas cercanas a su posición.
- Zonas con demasiados servidores, es decir, polución de pilotos.
- Excesivo solapamiento entre células.

Por todo ello, es necesario detectar y eliminar en lo posible esos sobrealcances. Se pueden detectar a partir de medidas mediante dispositivo especial con escáner y utilizando la herramienta de planificación. En el caso de producirse sobrealcances, los resultados de diversas medidas pueden indicar la necesidad de inclinar la antena que provocaba dicho sobrealcance. Las conclusiones se presumen del modo que sigue:

- Al inclinar la antena (mecánicamente o eléctricamente) seis grados se elimina el sobrealcance. Depende de la altura y orografía del terreno, pero ese valor suele ser bastante aceptable en condiciones normales.
- Las simulaciones muestran que aumenta la interferencia producida por los lóbulos traseros. Esto mejoraría con la utilización de inclinaciones eléctricas y antenas con buenos diagramas de radiación.
- La inclinación provoca un hueco de cobertura en la zona donde se producía el sobrealcance al no haber ningún otro servidor con buen nivel, por lo que en caso de suceder se determina la necesidad de un nuevo emplazamiento.

En emplazamientos donde la altura de la antena es grande en relación al radio de la célula y donde los requisitos de capacidad son grandes, la inclinación de la antena puede ser aumentada ligeramente (un grado aprox.) respecto al borde de cobertura para reducir el solapamiento como se muestra en la siguiente figura.

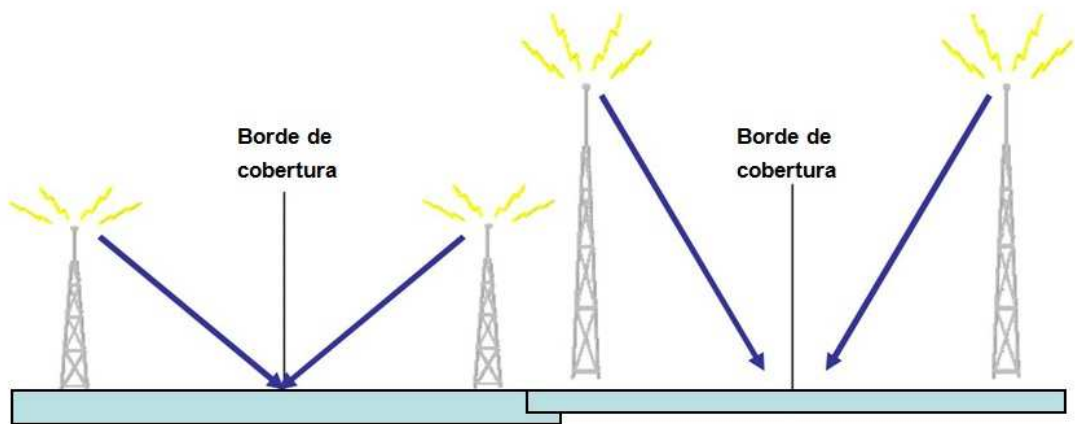


Figura 161. Borde de cobertura.

Las siguientes figuras ilustran lo que ocurriría en el caso en el que la inclinación de la antena no fuera tal que el haz principal apuntara al borde de cobertura.

Caso 1: Dirección del haz principal en el interior del área de cobertura de la célula.

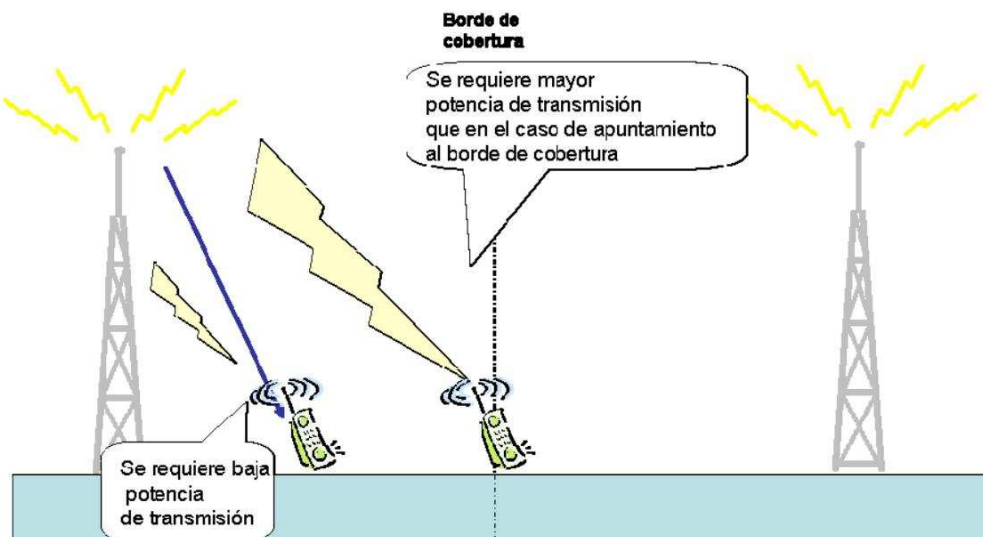


Figura 162. Borde de célula interior

Si el haz principal se dirige a un punto del interior del área de cobertura de la célula ocurre lo siguiente:

- Los móviles cercanos al emplazamiento no se ven afectados
- Los móviles que se encuentran en el borde de cobertura de la célula necesitan transmitir con mayor potencia ya que se encuentran fuera del haz principal (máxima ganancia de la antena) y esto causa un incremento de interferencia en las células vecinas y posibles problemas de cobertura en las fronteras.

Caso 2: Dirección del haz principal en el área de cobertura de otra célula.

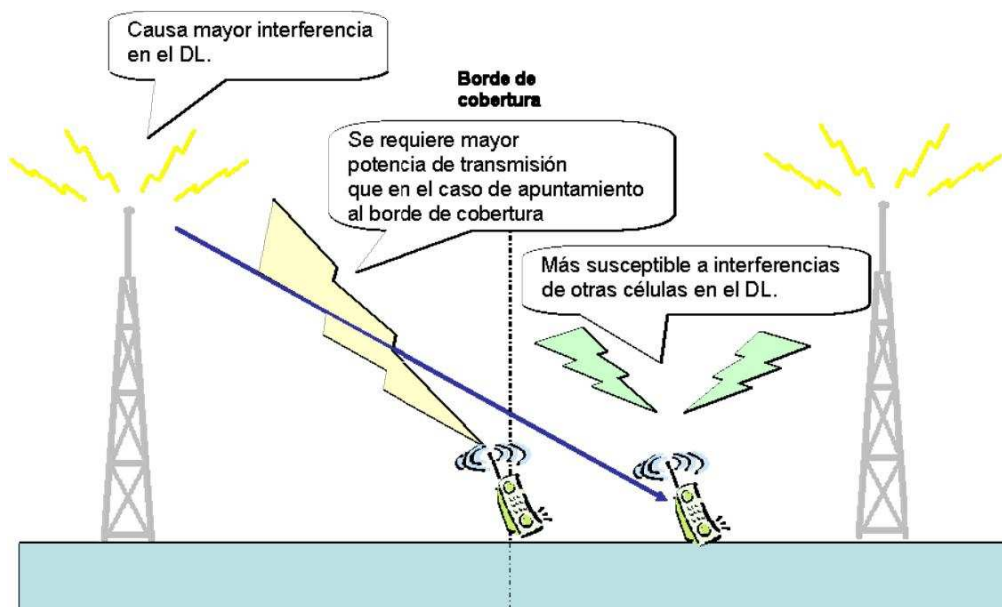


Figura 163. Dirección del haz en área de otra célula

Por el contrario, si el haz principal se dirige a un punto situado en el área de cobertura de otra célula:

- Los móviles que se encuentran en el borde de cobertura de la célula necesitan transmitir con mayor potencia ya que se encuentran fuera del haz principal (máxima ganancia de la antena).
- Los móviles que se encuentran situados a escasa distancia del emplazamiento necesitan transmitir con mayor potencia puesto que también se encuentran fuera del haz principal.

- Se incrementa el nivel de interferencia en el enlace descendente en la célula vecina donde está apuntado el haz principal.

Otro factor a tener en cuenta es el ancho de haz vertical de la antena utilizada. En el caso de que la apertura de haz fuera mucho mayor de lo recomendado, sería conveniente aumentar la inclinación de la antena para evitar solapamientos excesivos. En cualquier caso, se recomienda la comprobación con la herramienta de simulación de las zonas de solape cuando se utilicen antenas con características distintas a las habituales.

4.6.4.1.3. Polución de pilotos

La polución de piloto ocurre en áreas donde se reciben demasiados canales piloto para que puedan ser procesados por el receptor del terminal o bien, en zonas donde no hay un piloto dominante.

El móvil mide continuamente el nivel de señal y la calidad (RSRP o RSRQ).

Para obtener el valor del nivel RSRP (*Reference Signal Received Power*) el terminal realiza lo siguiente:

- a) Obtiene la potencia media de todos los símbolos *Reference Signal* (RS) de señalización en todo el ancho de banda.
- b) El terminal de usuario solamente toma medidas de los RS de su celda servidora.
- c) Reporta el valor de la medida dentro del rango -44...-133 dBm.

Para obtener el valor del nivel RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) el terminal realiza lo siguiente:

- a) Se obtiene el valor de RSRQ por medio de la siguiente expresión:

$$RSRQ = N \cdot RSRP / RSSI$$

Donde N es el número de RBs asignados y RSSI es el nivel de señal interferente más señal útil en el ancho de banda de interés.

- b) Reporta el valor de la medida dentro del rango -3...-19,5 dB.

4.6.4.1.4. Frecuencias disponibles para LTE

Las frecuencias disponibles para la tecnología LTE son las que siguen [42]:

Band	BW[MHz]	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]	Europe	Japan	Americas
1	2x60	1920-1980	2110-2170	●	●	UMTS core
2	2x60	1850-1910	1930-1990			● US PCS
3	2x75	1710-1785	1805-1880	●		1800
4	2x45	1710-1755	2110-2155			● US AWS
5	2x25	824-849	869-894			● US 850
6	2x10	830-840	875-885		●	Japan 800
7	2x70	2500-2570	2620-2690	●		2600
8	2x35	880-915	925-960	●		900
9	2x35	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9		●	Japan 1700
10	2x60	1710-1770	2110-2170			● Extended AWS
11	2x25	1427.9-1452.9	1475.9-1500.9		●	Japan 1500
12	2x18	698-716	728-746			● US700
13	2x10	777-787	746-756			● US700
14	2x10	788-798	758-768			● US700
17	2x12	704-716	734-746			● US700
18	2x15	815-830	860-875		●	Japan 800
19	2x15	830-845	875-890		●	Japan 800
20	2x30	832-862	791-821	●		UHF (TV)
21	2x15	1447.9-1462.9	1495.9-1510.9			TS36.101
24	2x34	1626.5-1660.5	1525-1559			

Figura 164. Frecuencias LTE disponibles

4.6.4.1.5. Necesidad de inclinación variable en zonas de alta densificación

En el caso de introducir un nuevo emplazamiento, se ajustan las inclinaciones de los sectores que se encuentran en su entorno para dejar "limpia" la zona que debe servir. Por ello, en la evolución de la red es necesario poder variar las inclinaciones de las antenas: en el caso de tilt fijo significa cambiar la antena (considerando que el tilt que se ajusta es el eléctrico, por su mejor comportamiento), o con tilt variable modificar el desfase de las antenas, bien en modo manual o remoto.

4.6.5. Proceso de ajuste de inclinaciones tras la introducción de una nueva Estación Base

Se describe en este apartado el proceso que se ha de seguir para la optimización de inclinaciones en zonas donde se introduce un nuevo eNodo B para asegurar que se delimita correctamente el área de servicio de cada célula.

4.6.5.1. Estimación de la inclinación necesaria en la nueva Estación Base

Cuando se detecta la necesidad de la instalación de un nuevo emplazamiento en una zona donde ya existe cobertura LTE (con objeto de mejorar la cobertura o por problemas de capacidad), es necesario delimitar la que será el área de servicio del nuevo eNodoB. La estimación del ángulo de inclinación de la antena se realizará de forma que se asegure que el haz principal en la dirección de máxima radiación de la antena apunte al borde del área de servicio que queremos garantizar. Siempre que sea posible se utilizarán antenas con inclinación variable de forma remota o, al menos, variable (manual) en zonas donde se prevea una alta densidad de emplazamientos.

El proceso que se seguirá es el que se describe a continuación:

- A partir de medidas en la zona donde se instalará la nueva estación, o bien, a partir de simulaciones realizadas con la herramienta de planificación, se delimitará un polígono que indique cuál es la cobertura deseada de cada célula.
- A partir de ese polígono se estima el radio de cobertura de la célula.
- Se estima la inclinación necesaria de forma que el haz principal apunte al borde del área de servicio (radio estimado). Como se ha comentado, si la altura de la antena de la estación es grande en comparación del radio estimado es conveniente incrementar en un grado la inclinación.
- Después de esta primera estimación, se realizarán simulaciones de forma que se asegure que la cobertura de la estación es la deseada y se ajustarán las inclinaciones en caso contrario.
- Como resultado de este proceso se obtendrá el ángulo de inclinación inicial de la estación (con el que se pondrá en servicio).
- Una vez que la estación está en servicio, las medidas realizadas durante la integración servirán para el ajuste detallado de la inclinación inicial (para eliminar sobrealcances, zonas de polución de piloto, etc que hayan podido no ser vistas en el proceso anterior).

4.6.5.2. Ajuste de inclinaciones en las Estaciones circundantes

Para asegurar que la nueva estación tiene un área de servicio clara, es necesario inclinar las antenas de los sectores circundantes (y que antes daban

servicio en esa zona). El proceso que se seguirá para determinar las nuevas inclinaciones de las células circundantes es similar al proceso de estimación de la inclinación de la nueva estación:

- Definición de los polígonos de cobertura de las células circundantes
- A partir de ese polígono se estima el radio de cobertura de la célula.
- Estimación de la inclinación necesaria de forma que el haz principal apunte al borde del área de servicio (radio estimado).
- Análisis de las medidas de integración para realizar un ajuste más fino.
- Comprobación del efecto de los cambios propuestos con la herramienta de planificación para asegurar que no dejamos huecos de cobertura por el hecho de inclinar las antenas.

4.6.6. Herramientas de optimización automáticas

Dada la importancia de la optimización de cobertura en LTE y lo tedioso que puede resultar el método manual propuesto, se pueden emplear diversas herramientas comerciales de optimización automática de parámetros LTE que ayuden en las tareas de optimización.

Estas herramientas están basadas en la optimización numérica de una función de coste ante cambios propuestos en la red, una algoritmia similar a la de los módulos de planificación automática de frecuencias GSM. De hecho, esta similitud con funcionalidades ya disponibles en herramientas de planificación/optimización 2G y 3G motiva que en el ámbito 4G sean muchas las empresas que disponen de estos módulos SW.

Estas herramientas fundamentalmente optimizan las relaciones de interferencia de la red mediante modificaciones en la configuración de los sistemas radiantes y las potencias del canal piloto, permitiendo a priori mejorar la capacidad y la cobertura del sistema. Básicamente, a la herramienta hay que alimentarla con los datos de red, de tráfico y los targets de servicio, y el sistema después de ejecutar su algoritmia sugiere modificaciones como reorientación de sectores, cambios de downtilt, modificaciones en los niveles de piloto, etc.

Asimismo, existe la posibilidad de ajustar las inclinaciones de forma remota con unos elementos auxiliares o integrados en la propia antena. De esta forma, la optimización se puede hacer en tiempo real y comprobar los resultados de forma más o menos inmediata.

Capítulo 5

PLAN DE DESPLIEGUE DE RED

5. Plan de Despliegue de Red

5.1. Introducción

La nueva Ley de General de Telecomunicaciones tiene como principal objetivo fomentar la inversión y simplificar el despliegue. En su presentación, los dos grandes objetivos mencionados fueron "facilitar el despliegue de las redes de nueva generación fijas y móviles, ampliando su cobertura y mejorar la oferta de servicios innovadores a los ciudadanos, de mayor calidad y a unos precios más asequibles, impulsando unas condiciones más efectivas de competencia" [43]. Asimismo, los ejes fundamentales son el impulso a la competencia, recuperar la unidad del mercado, eliminar y reducir cargas administrativas a los operadores y facilitar el despliegue de redes.

Como eje central, desde el punto de vista de despliegue de red para un operador de telecomunicaciones, se suprimen las licencias urbanísticas y medioambientales que serán sustituidas por declaraciones responsables. Además, para ciertos casos se requiere de un Plan de Implantación que defina el despliegue futuro de un operador para un municipio concreto [44]. Por ello, es importante plasmar en el presente trabajo un modelo de Plan de despliegue para el municipio de Rota, teniendo en cuenta las simulaciones realizadas en el capítulo anterior.

La gran problemática que han causado, la cada vez más, habitual presencia de antenas de diversa índole en el panorama de las ciudades y demás entornos, como pueden ser, los Polígonos Industriales o Autovías y carreteras, hacen necesario el ingenio para minimizar el impacto visual de los emplazamientos utilizados por las operadoras para así garantizar un mejor mantenimiento de las redes móviles y poder así disminuir la alarma social.

Los distintos informes sobre estudios realizados por medio de una gran multitud de organismos oficiales y un buen número de Universidades, no ha sido motor para un descenso notorio en la preocupación de los ciudadanos.

El mayor problema es la falta de información y el carácter especial con el que han tratado a ciertos lugares denominados puntos sensibles en el RD 1066/2001, como son centros geriátricos, colegios, parques públicos, etc. (Ver anexo II sobre antenas y salud).

A continuación se muestran de forma gráfica un sinfín de soluciones integrales de bajo impacto visual, lo que lleva detrás un gran trabajo de campo, para la obtención de las fotografías adecuadas a cada tipo de solución.

5.2. Plan de Despliegue de Red de Telefonía Móvil de la ciudad de Rota

5.2.1. Antecedentes

5.2.1.1. Generalidades

MV Comunicaciones (MV) es una empresa revolucionaria del sector de las Telecomunicaciones y en el servicio de Telefonía Móvil en España, que apuesta claramente por las comunicaciones del futuro, los nuevos servicios de tercera generación UMTS y los servicios avanzados como son el HSPA y la cuarta generación.

MV, como el resto operadores móviles en España, ha asumido el compromiso de garantizar la disponibilidad de los servicios móviles desde cualquier punto del territorio. Fruto de este compromiso, España es el país que posee la mejor cobertura, geográfica y de población, simultáneamente.

La calidad de servicio que ofrece un operador de telecomunicaciones a sus clientes depende, en gran medida, de la capacidad y extensión de la red desplegada. En el caso concreto de la telefonía móvil, con el fin de prestar el mejor servicio posible a los clientes, los operadores realizan una planificación radio que permita maximizar la capacidad y cobertura de la red con el espectro disponible, es decir, se procura obtener la mayor eficiencia posible a partir del espectro radioeléctrico que cada operador tiene reservado, haciendo que los beneficios de la explotación de un bien público reviertan en la mayor medida posible en los ciudadanos, que podrán así disponer de una mayor calidad y una mayor oferta de servicios móviles.

Para MV el mayor activo con que cuenta son sus clientes, por lo que continuamente se encuentra en proceso de expansión de su red con el fin de conseguir la máxima satisfacción de los mismos, ya que si bien el espectro es el medio para que el operador móvil consiga llegar al usuario, esto no es posible sin una red que permita establecer, mantener y gestionar las comunicaciones.

La Red de MV está compuesta principalmente por una serie de Estaciones Base que proporcionan servicio en prácticamente todo el territorio nacional (principalmente capitales de provincia y poblaciones mayores), habitualmente instaladas en edificios y en zonas elevadas. Dentro de la evolución de la red, y con el fin de mejorar la calidad de la misma, se hace necesaria la instalación en entornos urbanos y residenciales de nuevas Estaciones Base que permitan ofrecer un servicio integral a todos sus clientes.

Asimismo, MV Comunicaciones está desarrollando un despliegue de red en todo el territorio nacional atendiendo a lo que los usuarios reclaman, es decir, mejorar nuestra red en todos los núcleos urbanos.

Por todo ello y para dar cumplimiento al acuerdo del Ayuntamiento de Rota, con la necesidad de presentar por parte de los Operadores un Plan de despliegue de sus instalaciones, se propone en el presente documento un Programa de Desarrollo del servicio de MV Comunicaciones en el término municipal de Rota, con especial atención a los núcleos urbanos, así como la dotación de cobertura en aquellas zonas y enclaves en expansión, contemplándose en el mismo un proyecto orientativo de instalación de Estaciones Base que permita garantizar una cobertura integral a los usuarios del servicio.

5.2.1.2. Titularidad

El Titular de la Actividad es la empresa MV Comunicaciones (MV).
La empresa tiene su domicilio social en la Ronda Norte s/n.

5.2.1.3. Descripción de la actividad

Como se ha indicado con anterioridad, el conjunto de equipos y antenas que constituyen las estaciones base, tienen por objeto la transmisión y recepción de las señales radioeléctricas de telefonía móvil correspondientes a los sistemas UMTS operado por MV Comunicaciones.

Una estación base permite que la señal enviada hacia/por los terminales móviles llegue a su destino, para lo cual está conectada con la red de telefonía básica.

El sistema se opera remotamente desde una central por lo que no precisa de operadores. Además lleva integrado un sistema de alarma de incidencias o averías que son transmitidas hacia la mencionada central desde la que se dan las correspondientes órdenes de reparación.

Todos los equipos de comunicaciones funcionan en corriente continua - 48 V disponiendo de rectificadores, o en corriente alterna a 220 Vac, dependiendo de las versiones utilizadas.

5.2.1.4. Cumplimiento de normas de seguridad y salubridad

La actividad no se encuentra incluida en el nomenclator anexo al Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas, cumpliendo las normas actualmente vigentes en materia de protección frente a emisiones de radiofrecuencia, en línea con las recomendaciones de la Unión Europea U.E. 1999/519/CE, así como las directrices del ICNIRP (Comisión Internacional de Protección frente a radiaciones no ionizantes).

Así mismo, todas las estaciones base de MV cumplen la normativa vigente en cuanto a los límites de exposición establecidos en el Reglamento del Real Decreto 1066/2001, de 28 de Septiembre, que establece condiciones de

protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. A tal efecto, en este momento ya se han realizado los proyectos técnicos y certificaciones exigidas por el Real Decreto de acuerdo a lo establecido en la Orden Ministerial CTE/23/2002 de 11 de Enero de 2002.

5.2.1.5. Nueva Ley de Telecomunicaciones 9/2014, de 9 de Mayo

En el BOE número 114, de 10 de mayo de 2014, se publica la nueva Ley de Telecomunicaciones, de cuyo preámbulo se extraen los siguientes objetivos fundamentales:

Facilitar el despliegue de redes de nueva generación, tanto fijas como móviles, para ampliar su cobertura.

Mejorar la oferta de servicios innovadores a los ciudadanos, de mayor calidad a unos precios asequibles, impulsando unas condiciones más efectivas de competencia.

Recuperación de la unidad de mercado, de manera que los operadores de telecomunicaciones desarrollen su actividad en un contexto de reglas únicas en toda la geografía española:

- Se diseñan nuevos mecanismos de coordinación y colaboración del Estado con las CCAA y las Entidades Locales para que se facilite el despliegue de redes de telecomunicaciones.

- Se establecen requisitos técnicos comunes para el despliegue de redes, así como límites máximos únicos de emisión y exposición a los campos electromagnéticos en todo el territorio nacional.

Se suprimen las licencias urbanísticas y medioambientales para el despliegue de redes de telecomunicación en dominio privado. Las licencias serán sustituidas por declaraciones responsables.

Para desplegar las nuevas redes de telecomunicaciones, los operadores podrán reutilizar las canalizaciones, conductos y emplazamientos de titularidad pública o de otras redes de operadores privados.

De su contenido destacamos aquellos artículos novedosos:

Título I (Disposiciones generales)

Artículo 2.1: Las telecomunicaciones son servicios de interés general que se prestan en régimen de libre competencia.

Título III (Obligaciones de servicio público)

Artículo 25.1: Se entiende por servicio universal el conjunto de servicios cuya prestación se garantiza para todos los usuarios finales con independencia de su localización geográfica, con una calidad determinada y a un precio asequible. Bajo el mencionado concepto de servicio universal se deberá garantizar, en los términos y condiciones que mediante real decreto determine el Gobierno, lo siguiente:

- Una conexión que permita realizar llamadas de voz, fax y datos, a velocidad suficiente para acceder de forma funcional a internet (1 Megabits por segundo de velocidad descendente).
- La conexión permitirá llamadas nacionales e internacionales.
- Disponer de una guía general de números de abonados.
- Oferta suficiente de teléfonos públicos.
- Ausencia de discriminación para los usuarios finales con discapacidad.
- Ofrecimiento a los consumidores que sean personas físicas, de acuerdos con condiciones transparentes, públicas y no discriminatorias, de opciones o paquetes de tarifas que difieran de las aplicadas en condiciones normales, con objeto de garantizar a las personas con necesidades especiales el acceso a la red y los servicios incluidos en el concepto de servicio universal.

Título V (Dominio Público Radioeléctrico)

Artículo 60.1: El espectro radioeléctrico es un bien de dominio público, cuya titularidad y administración corresponden al Estado.

Artículo 60.2: La administración del dominio público radioeléctrico se llevará a cabo teniendo en cuenta su importante valor social, cultural y económico y la necesaria cooperación con otros Estados miembros de la UE y con la Comisión Europea en la planificación estratégica, la coordinación y la armonización del uso del espectro radioeléctrico en la UE.

Artículo 62.1: El uso del dominio público radioeléctrico podrá ser común, especial o privativo:

El uso común no precisará de ningún título habilitante y se llevará a cabo en las bandas de frecuencias y con las características técnicas que se establezcan al efecto.

El uso especial es el que se lleva a cabo en las bandas de frecuencias habilitadas para su explotación de forma compartida, sin limitación de número de operadores o usuarios y con las condiciones técnicas y para los servicios que se establezcan en cada caso.

El uso privativo del dominio público radioeléctrico es el que se realiza mediante la explotación en exclusiva o por un número limitado de usuarios de determinadas frecuencias en un mismo ámbito físico de aplicación.

En consecuencia, la Ley 9/2014, de 9 de mayo, de Telecomunicaciones, no introduce ninguna variación en la regulación del espectro radioeléctrico, sino que ratifica la posición competencial del Estado y pretende garantizar la unidad de mercado para el conjunto de operadores en toda la geografía española.

5.2.2. OBJETO DEL INFORME

- Analizar en primer lugar la situación actual de la Red Radio de Telefonía Móvil para los sistemas LTE (4ª generación) en el término municipal de Rota (Cádiz).
- Evaluar las necesidades de nuevas Estaciones Base para el sistema LTE (4ª generación).

5.2.2.1. PRINCIPIOS BASICOS DE UNA RED DE TELEFONIA MOVIL

5.2.2.1.1. Funcionamiento de una red celular

Una red de telefonía móvil está fundamentada en la distribución espacial de Estaciones Base dotadas de equipos de transmisión y recepción radio, así como de antenas que transmiten y reciben la señal radio con la que se establece la comunicación con el terminal móvil del usuario. Estas Estaciones Base están conectadas entre sí mediante una red de transmisión y conmutación.

Una Estación Base puede albergar varios equipos de transmisión/recepción, y cada equipo (en función de la tecnología) puede ser capaz de ofrecer un número determinado de canales de comunicación a los usuarios. El número máximo de equipos (de canales de comunicación, en definitiva) que se puede instalar en una Estación Base está limitado por diversos factores, aunque sin duda alguna el más relevante de todos ellos es la necesidad de evitar interferencias (lo cual, a su vez, deviene de la finitud del espacio radioeléctrico adjudicado).

BANDA	UP-LINK	DOWN-LINK
900 MHz	890.10 – 903.90 MHz	935.10 – 948.90 MHz
1800 MHz	1710.10 – 1730.10 MHz	1805.10 – 1825.10 MHz
2100 MHz	1965.10 – 1980.10 MHz	2155.10 – 2170.10 MHz

Se entiende por espacio radioeléctrico una banda concreta de frecuencias usada en una superficie determinada. MV Comunicaciones tiene adjudicada en todo el territorio del Estado y por concesión administrativa una

parte de lo que se define como banda LTE. Así pues, MV Comunicaciones dispone de un juego concreto de frecuencias para proporcionar el servicio de telefonía móvil automática celular digital.

Se muestra a continuación una breve justificación teórica acerca de las necesidades y prestaciones de los distintos sistemas de telefonía móvil, diferenciando entre el sistema GSM y DCS, el sistema UMTS y finalmente el sistema LTE.

Sistema GSM y DCS:

Si las frecuencias de las ondas electromagnéticas son próximas entre sí, y coinciden en una misma zona con niveles de potencia comparables, éstas se interfieren mutuamente provocando serias degradaciones de la forma de onda de las señales y por tanto de la calidad de servicio. Esto determina el número máximo de frecuencias (a la postre, de canales) que una Estación Base puede radiar, ya que las frecuencias radiadas en una misma área de terreno deben estar suficientemente separadas, y el número de frecuencias disponibles es limitado, como ya se ha señalado.

Por otra parte, la vocación de la telefonía móvil automática como servicio público y por consiguiente con una importante penetración social, conlleva una demanda cada vez mayor de canales de comunicación. Este hecho hace absolutamente necesaria la utilización de todas y cada una de las frecuencias disponibles, lo cual es completamente imposible con una sola Estación Base que dé cobertura a una gran extensión de terreno, pues las colisiones frecuenciales serían permanentes.

La consecuencia principal de estas consideraciones es que el diseño óptimo de una red de telefonía móvil debe estar basado en el concepto de red celular, y así es usado por la totalidad de operadores de telefonía móvil automática del mundo. En virtud de este tipo de despliegue, la superficie en cuestión se subdivide en zonas de cobertura denominadas células en el centro de cada una de las cuales (inicialmente) está situada una Estación Base. De este modo, es posible controlar el nivel de interferencias puesto que las Estaciones Base de células vecinas se diseñan con frecuencias suficientemente separadas, y las de células alejadas pueden tener frecuencias coincidentes o adyacentes gracias a que los niveles de potencia transmitidos y el mecanismo de propagación radio limitan el alcance de estas señales de modo que las interferencias entre estas células alejadas sean admisibles por el sistema. Así, el radio de alcance de una Estación Base se dimensiona de modo tal que no sean sólo las condiciones de propagación las que lo limiten, sino que también el nivel de interferencias que se puede asumir. Estamos hablando en definitiva de un sistema limitado más en interferencia que en potencia.

Con anterioridad se ha señalado que el nivel de interferencias está determinado por la necesidad de uso de frecuencias y en definitiva por la cantidad de usuarios a los que se pretende dar servicio. Como quiera que se trata de un sistema limitado principalmente en interferencia, habrá distintos

radios de cobertura apropiados para entornos con distintos niveles de interferencias. Hay por tanto una variada casuística de diseños de red celular, según el entorno en consideración. Así, en una ciudad importante, donde se origina mucho tráfico, se trabaja con radios de célula del orden de unos cientos de metros mientras que en una carretera, donde hay muchas menos llamadas, el radio de célula considerado para la planificación suele ser de unos pocos kilómetros.

Antes de continuar con estos razonamientos conviene detenerse en el tipo de interferencias que se suelen tener en cuenta. En este sentido, las dos señales interferentes que más pueden afectar a una señal interferida son aquéllas cuya frecuencia coincide plenamente con la señal interferida o bien aquéllas cuya frecuencia es muy próxima a la de la señal interferida. El primer caso se da cuando los canales son los mismos (interferencia cocanal) mientras que el segundo ocurre cuando los canales correspondientes son consecutivos (interferencia por canal adyacente). Y como no podía ser de otra manera, la que más efectos perniciosos tiene es la primera de las dos señaladas.

En las figuras adjuntas, se puede apreciar un ejemplo simplificado de lo expuesto: sean f_1 , f_2 , f_3 y f_4 las frecuencias disponibles, y asumamos que cada frecuencia es portadora de n canales lógicos de comunicación. Si el área comprendida dentro de la línea de trazos es la que se pretende cubrir, en el caso 1 (sin recurrir a la estructura celular) tendríamos a disposición de los usuarios de ese área $4 \times n$ canales, pero con mala calidad pues en la misma zona se estarían transmitiendo frecuencias adyacentes (f_1 y f_2 , por ejemplo). Para evitar estos problemas habría que renunciar a dos de las cuatro frecuencias (quedando f_1 y f_3 , no adyacentes, por ejemplo) a costa por tanto de reducir la capacidad. En cambio, en el caso 2 (estructura celular) se consigue tener $4 \times n$ canales disponibles, pero ahora con buena calidad, pues aun siendo f_1 - f_2 y f_3 - f_4 portadoras adyacentes, tienen zonas de cobertura distintas y no coinciden. Si el tamaño de las células se hace menor (caso 3), se puede apreciar que en esa misma área de servicio se están ofreciendo más de $6 \times n$ canales a los usuarios (a los que se supone uniformemente distribuidos) sin menoscabo de la calidad.

En la tabla siguiente se resumen los resultados, incluyendo implicaciones económicas, de los tres casos propuestos. Para la valoración del impacto económico se consideran dos tipos de coste: el asociado al emplazamiento de la estación base (con infraestructura y equipos genéricos incluidos) y el asociado a los equipos radio específicos (portadoras).

Caso	Capacidad	Coste
1	$4 \times n$ canales (muy mala calidad)	$1 \times \text{coste infr. y eq.} + 4 \times \text{coste port.}$
1	$2 \times n$ canales (calidad aceptable)	$1 \times \text{coste infr. y eq.} + 2 \times \text{coste port.}$
2	$4 \times n$ canales	$2 \times \text{coste infr. y eq.} + 4 \times \text{coste port.}$
3	$6 \times n$ canales	$6 \times \text{coste infr. y eq.} + 6 \times \text{coste port.}$

Se puede concluir por tanto que la subdivisión en celdas cada vez más pequeñas multiplica el coste, pero aumenta considerablemente la capacidad sin que por ello la calidad se vea comprometida.

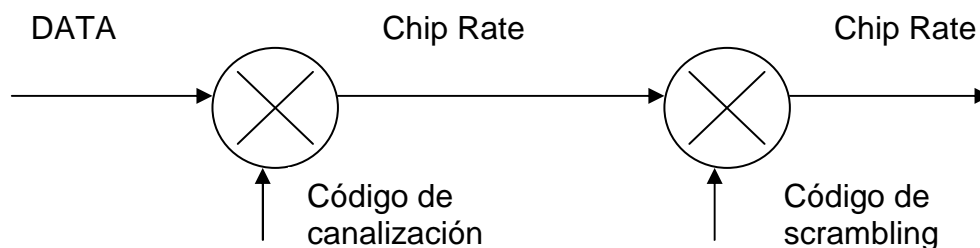
Sistema UMTS:

El esquema de acceso en el estándar UMTS es Direct-Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA) con la información transmitida en un espectro ensanchado de aproximadamente 5 Mhz, por lo que se denomina Wideband CDMA (WCDMA).

El interfaz radio (UTRA UMTS Terrestrial Radio Access) tiene dos modos FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex). En este documento se estudia la asignación de códigos en el modo FDD. En este modo se transmite y se recibe en frecuencias separadas.

En FDD la velocidad de la información con la que puede transmitir un móvil depende de la velocidad de chip que es de 3.84 Mcps (4096 Mchips/s), del factor de ensanchado o spreading factor, que en FDD varía de 4 a 256 para el enlace ascendente y de 4 a 512 para el enlace descendente, de la modulación y fase, y de los canales o códigos que el móvil tiene asignado. Un recurso en UMTS para FDD está indicado, por tanto, por la frecuencia, el código y la fase, I – Q.

Para diferenciar canales, usuarios y estaciones base se utilizan los códigos. En UMTS se usan dos tipos de códigos: los códigos de canalización y los códigos de aleatorización o scrambling.



Los códigos de canalización son códigos ortogonales denominados OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor), estos códigos permiten separar la información que envía la BTS, canales de datos y señalización, a los móviles (en el DL), y los diferentes canales que un móvil envía a la BTS (en el UL), y además permiten ensanchar la señal, es decir, conseguir el régimen binario de 38400 chips por cada 10 ms. Cada móvil es capaz de extraer su información en el DL utilizando los códigos que tiene asignados. En ambos casos, como la señal llega sincronizada es posible extraer la información utilizando códigos ortogonales. Sin embargo, las señales que llegan de otras BTS al móvil (en el DL), o las señales que llegan de otros usuarios a la BTS (en el UL) no llegan sincronizadas, por lo que no es posible eliminar completamente estas señales

aunque se usaran códigos ortogonales. Es por eso que se usan los códigos de aleatorización o scrambling, que si bien no son ortogonales, tienen unas buenas propiedades de correlación: presentan valores bajos de correlación con los demás códigos y las versiones desplazadas de estos.

Por tanto los códigos de scrambling se utilizan para separar las señales procedentes de varios móviles a una BTS en el UL y para separar las señales que llegan de otras estaciones base en el DL. Estos códigos no afectan a la velocidad de transmisión o ancho de banda de la señal, como ocurre en los casos de los códigos de canalización.

Existen varios factores que limitan la capacidad de una célula UMTS, entendida como la capacidad de cursar simultáneamente un número determinado de llamadas:

- Limitaciones hardware en el nodo (número de elementos de canal)
- Limitaciones radio (potencia disponible en el DL, interferencia en UL, códigos)
- Limitaciones en transmisión (capacidad de los E1's de la interfaz Iub)

SISTEMA LTE

Las dos características de LTE que más destacan con respecto a las redes 2G y 3G anteriores son las siguientes:

- Un acceso radio más flexible gracias al uso de la modulación OFDM, que permite altas velocidades de pico.
- Una arquitectura más simple basada en IP y sin conmutación de circuitos, que permite latencias menores

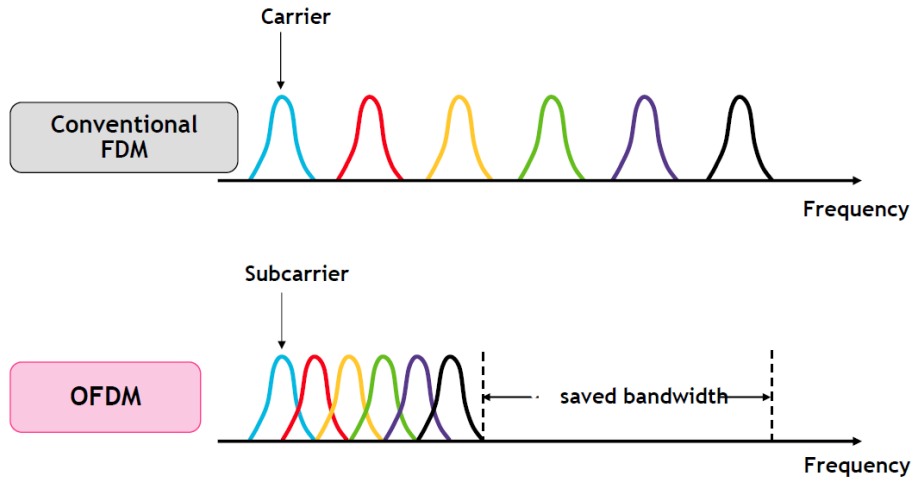
3G es poco flexible porque las portadoras que se utilizan son de un ancho de banda fijo (5 MHz). Este hecho dificulta la gestión del espectro y la escalabilidad de la red. Para solucionar este problema LTE utiliza OFDM. El principio básico de OFDM es dividir todo el espectro disponible en subportadoras de banda estrecha separadas entre sí 15 KHz, de forma que el e-NodeB decide cuantas subportadoras dedica a cada usuario. Las subportadoras se asignan en bloques de 12 y por un tiempo mínimo de 1 ms. Es posible así agregar subportadoras conforme el usuario demanda más ancho de banda. El número máximo de subportadoras varía entre 72, si la célula tiene un ancho de banda de 1,4 MHz, y 1200 para un ancho de banda de 20 MHz. Analizamos OFDM con un poco más de profundidad:

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión el cual

envía un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM, PSK o QPSK.

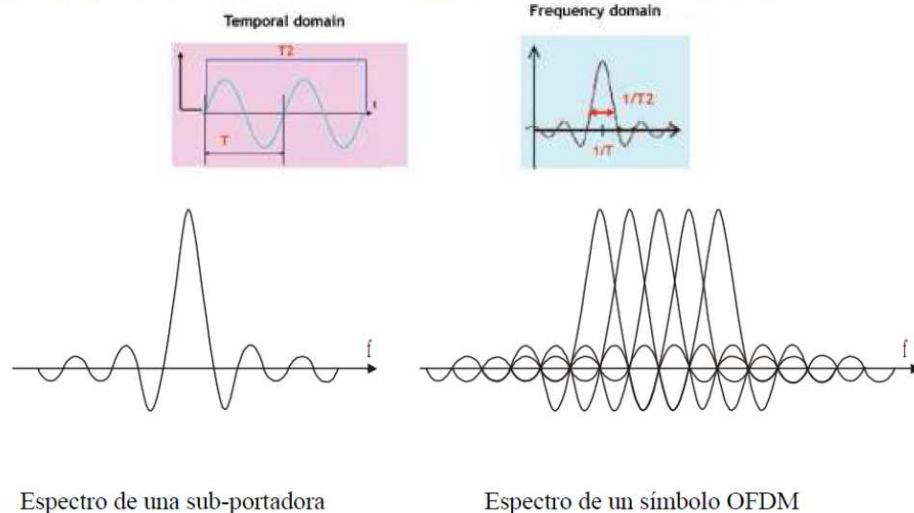
OFDM es un caso particular de FDM (usado por ejemplo en GSM):



OFDM divide un canal en un número determinado de bandas de frecuencia equiespaciadas, en cada banda se transmite una subportadora que transporta una porción de la información. Cada subportadora es ortogonal al resto. Si usamos como portadora una señal sinusoidal, el área de un periodo es cero ya que la parte positiva de la señal se cancela con la negativa.

Este concepto de ortogonalidad es clave en OFDM ya que nos permite la transmisión simultánea en un estrecho rango de frecuencias y sin que se produzcan interferencias entre ellas.

Transformada de Fourier - Paso del dominio del tiempo al de la frecuencia

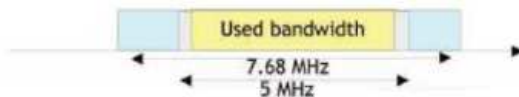


Parámetros OFDMA en LTE:
 - El ancho de banda y el espaciado de cada una de las subportadoras es de 15 KHz.

- El ancho de banda es flexible y escalable, a mayor ancho de banda, mayor capacidad (en 10 MHz hay el doble de subportadoras que en 5 MHz y en consecuencia la capacidad también es el doble).
- BW= 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- La asignación mínima de recursos a un usuario en LTE se denomina Resource Block (RB) = 12 subportadoras durante 1 mseg (14 símbolos =OFDM con CP normal).

Spectrum allocation	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Sub-carrier spacing	15 kHz					
Sampling frequency	1.92 MHz (1/2 × 3.84)	3.84 MHz	7.68 MHz (2 × 3.84)	15.36 MHz (4 × 3.84)	23.04 MHz (6 × 3.84)	30.72 MHz (8 × 3.84)
Number of sub-carriers FFT size	128	256	512	1024	1536	2048
Number of useful sub-carriers	72 (73)	180 (181)	300 (301)	600 (601)	900 (901)	1200 (1201)

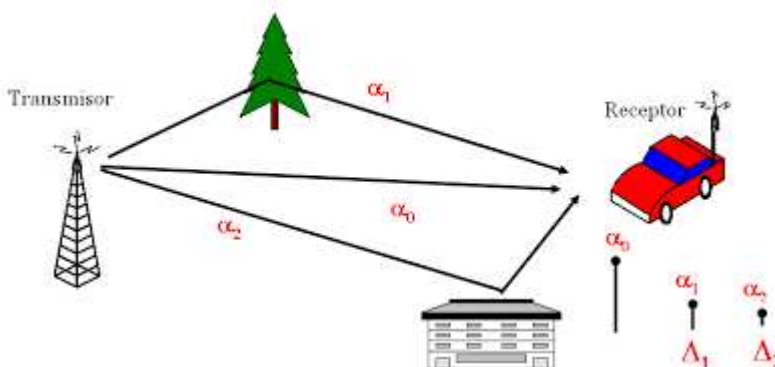
Para los 5 MHz hay 512 subportadoras de 15 kHz, lo que hace una banda total de 7,68 MHz, pero solo se usan 301 subportadoras (pilotos, dc, datos...), las otras son subportadoras de guardia, por lo que quedan 4,515 MHz.



Hay dos puntos clave en OFDM:

- Canales con multitrayectoria

En un sistema inalámbrico existe el problema de las trayectorias múltiples que generan ISI y desvanecimiento selectivo. La multitrayectoria es un fenómeno de interferencia causado por señales reflejadas en estructuras o superficies reflectoras las cuales, habiendo recorrido mayor distancia que la correcta, inducen errores de recepción. Estos rayos poseen un retardo y una ganancia ligeramente diferentes.

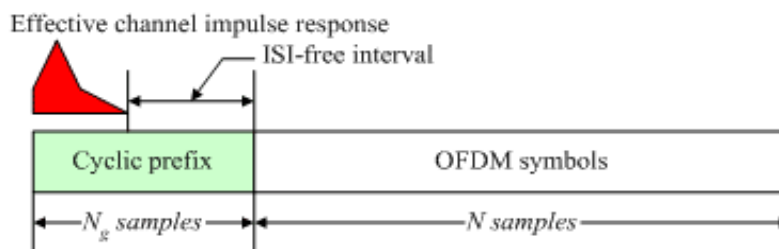


El sistema MIMO, implementado en LTE, usa múltiples antenas para simultáneamente transmitir datos, en pequeños pedazos hacia el receptor, el cual puede procesar el flujo de datos y poderlos reconstruir. Este proceso

llamado multiplexación espacial, proporcionalmente incrementa la velocidad de transmisión por un factor igual al número de antenas de transmisión.

- Prefijo cíclico

Si bien la modulación OFDM tiene menos interferencia entre símbolos que los sistemas monoportadores, sigue teniendo algo de interferencia. Esta se puede evitar usando un prefijo cíclico de longitud igual o mayor que el máximo rango de retardo de canal (en un canal que tenga K tomas entre muestras, en número muestras de guarda del prefijo cíclico ha de ser $N_g = K - 1$) como se muestra en la figura inferior.



Se utiliza como una especie de banda de guarda para cada símbolo. Consiste en "copiar" la parte inicial de la señal en tiempo y "pegarla" al comienzo. La duración del prefijo cíclico debe ser como máximo $\frac{1}{4}$ de la duración de cada símbolo. La ortogonalidad entre portadoras se mantendrá. Si el prefijo cíclico es muy grande produce gran retardo en la señal, pero baja la BER, por lo que se utilizará prefijo cíclico extendido en escenarios donde haya más dispersión (mayores distancias).

La técnica de modulación OFDM, comparada con las técnicas de portadora única, tiene las siguientes ventajas: alta eficiencia espectral, simplicidad en la implementación de la FFT, baja complejidad en la implementación del receptor, utilizado en transmisión a velocidades elevadas en entornos con desvanecimiento multirrayecto, elevada flexibilidad en la adaptación de enlaces y una reducida complejidad en la implementación de estructuras de acceso múltiple (OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Una de las principales ventajas de la modulación OFDM con respecto a emplear una sola portadora es la robustez frente a las diferencias de retardo. La distribución del retardo de canal provoca interferencias entre símbolos que, a su vez, limitan la velocidad de los datos, al elevar el suelo de error. Pero en OFDM la duración de símbolo en cada subportadora es N veces mayor que en los sistemas monoportadora. De ahí procede la robustez del OFDM frente a las diferencias de retardo.

Como se ve, LTE se ha diseñado para operar con reuso de frecuencia:

- No hay interferencia intracelda, ya que las sub-carrier son ortogonales, y el eNodo se asegura de que no se asignan los mismos bloques de recursos en más de un terminal por celda.
- La principal fuente de interferencia en LTE es la interferencia intercelda.

Igual que en UMTS, existen varios factores que limitan la capacidad de una célula LTE, entendida como la capacidad de cursar simultáneamente un número determinado de llamadas:

- Limitaciones de usuarios por celda en el e-nodo (aunque LTE tiene un límite mucho mayor).
- Limitaciones radio (potencia disponible en el DL, interferencia en UL,...).
- Limitaciones en transmisión (capacidad de la interfaz S1-U).

5.2.2.1.2. Fases de despliegue de una red celular

Las Redes de Telefonía Móvil se van desarrollando a lo largo de los años según diferentes fases, siendo la "*Calidad del Servicio ofrecido*" el elemento dinamizador de estas redes. Podemos diferenciar en diferentes fases.

Fase Inicial

La calidad del servicio en esta fase se fundamenta en el concepto de cobertura, es decir se persigue ofrecer nivel de señal que permita establecer la comunicación móvil en la mayor zona geográfica posible, siendo el parámetro de diseño de las redes de esta primera fase la Cobertura de Exteriores (la red radio se diseña para la prestación del servicio en espacios abiertos, calles, carreteras, existiendo la posibilidad de establecer comunicaciones en algunos interiores de edificios).

Fase de Crecimiento

Durante la fase de crecimiento el número de usuarios del sistema se incrementa provocando que el concepto capacidad comience a tener relevancia en el diseño de las redes; se entiende por capacidad de una red la posibilidad de ofrecer simultáneamente el servicio a un número determinado de usuarios. Los operadores se ven obligados a incrementar la capacidad de sus redes de telefonía móvil. Este aumento en capacidad se logra por dos vías diferentes: una es la ampliación de canales en las Estaciones Base (hasta un número máximo posible, limitado por la banda de frecuencias que cada operador tiene asignada), y otra es mediante el despliegue de nuevas Estaciones Base en el área de servicio (se entiende por área de servicio la zona geográfica dónde se establecen las comunicaciones móviles).

También en esta fase de crecimiento de las redes se comienza a demandar una "*Mejor Calidad del Servicio Ofrecido*", el concepto de cobertura evoluciona de la primera fase Cobertura de Exteriores hacia el concepto de Cobertura de Interiores o Cobertura Total. Se demanda poder establecer la comunicación esté donde esté, ya sea en zonas abiertas en la calle como en el interior de edificios, naves industriales, parkings, etc. Esto lleva a los operadores a la necesidad de aumentar el número de Estaciones Base en la zona de servicio, la Estación Base debe estar más cerca del móvil para poder establecer la comunicación. La comunicación se sustenta sobre una señal radio que se ve atenuada por la distancia y la penetración a través de los diferentes obstáculos (muros, separaciones entre plantas, paredes, etc.), es decir, a mayor distancia y mayor número de obstáculos el nivel de señal disminuye haciendo imposible la comunicación.

Fase de Servicios

Una vez que las redes han logrado obtener la "Cobertura Total" y la "Capacidad Necesaria", la mejora de la "Calidad del Servicio Ofrecido" a los usuarios, se sustenta en el desarrollo de Nuevos Servicios y la mejora de los índices generales de número de llamadas interrumpidas, calidad de las comunicaciones tanto de voz como de datos, mejora en los índices de velocidades de las transmisiones de datos, etc.

En esta fase la implantación de nuevas Estaciones Base se fundamenta en la necesidad de mejora de estos índices mencionados anteriormente.

Actualmente nos encontramos entre la Fase de Inicial y la Fase de Crecimiento, es claro que no existe "Cobertura Total" y también es patente el hecho de que es necesario acometer mejoras en los índices de calidad de red (llamadas interrumpidas, calidad de la comunicación, aumento de las velocidades de transmisión de datos, etc.), por tanto las Redes de Telefonía Móvil deben de proseguir en la implantación de nuevas Estaciones Base.

5.2.3. INFRAESTRUCTURAS RADIO EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE ROTA: NECESIDADES DE CRECIMIENTO A CORTO Y MEDIO PLAZO

5.2.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA OBJETO DE SERVICIO

La zona Objeto de Servicio abarca al término municipal de Rota, en la provincia de Cádiz.

5.2.3.1.1. Descripción de la zona Objeto de Servicio

La zona Objeto de Servicio abarca el término municipal de Rota, en la provincia de Cádiz.

Su extensión superficial es de 84 km² y limita con las ciudades de Chipiona, Sanlúcar de Barrameda y El Puerto de Santa María. Se encuentra situada a una altitud de 9 metros y a 36 kilómetros de la capital de provincia, Cádiz. En el municipio se pueden destacar dos partes diferentes, la Villa de Rota y la zona de Costa Ballena.

Situada junto a la bahía de Cádiz en la costa de Océano Atlántico, a medio camino entre Portugal y Gibraltar, es una ciudad eminentemente turística, un destino vacacional para viajeros procedentes de todos los puntos de Europa. En temporada baja, su principal actividad comercial es la industria pesquera. En su término municipal está enclavada la Base Naval de Rota.

El pinar costero, plantado a principios de siglo, es el espacio natural más importante. Compuesto principalmente por pino piñonero y retama blanca. Señalar el sistema de dunas tanto en estas costas como en el recinto de la Base Naval, éste último, que constituye un auténtico santuario para algunas especies.

El animal que destaca dentro de la amplia fauna de aves, reptiles e insectos es el camaleón común; especie catalogada de vulnerable, que ha vivido momentos difíciles, pero que se ha recuperado paulatinamente gracias a algunos programas de conservación.

La ciudad de Rota es marco de importantes celebraciones y eventos entre los que se destacan la Semana Santa, Carnaval, Feria de Primavera, Romería de San Isidro Labrador, Feria de la Urtā, celebrada en agosto, declarada de interés turístico y sus fiestas Patronales, día de Nuestra Señora del Rosario Coronada, patrona de la Villa.

Toda la pujante actividad anterior hace que las posibilidades de dar un buen servicio por la red actual de MV Comunicaciones vayan quedando limitadas. Esto unido a los requerimientos de la nueva generación de telefonía móvil justifican una ampliación de la red existente, especialmente en áreas del centro de la ciudad. Así como en las zonas de expansión del municipio.

5.2.3.1.2. Parámetros de diseño de Red

La red actual está diseñada de acuerdo a los siguientes parámetros de Calidad:

- Ofrecer Cobertura de Interiores en la mayor parte de la población.

- Ofrecer la Capacidad Necesaria en la época de mayor tráfico telefónico.
- Ofrecer Calidad de Servicio.

5.2.3.1.3. Descripción de la Red Existente

El presente documento es anterior al despliegue inicial de red que presta servicio LTE en el término municipal de Rota, por lo que en la actualidad no existen emplazamientos del operador MV Comunicaciones.

En el Anexo I puede visualizarse la situación de las estaciones base actualmente en planificación y en vías de contratación con los propietarios, así como la ubicación prevista para las de futura implantación.

5.2.3.2. Justificación de la solución técnica actual

La red que actualmente presta servicio MV en el término municipal de Rota tiene como principal cometido los anteriormente reseñados parámetros de calidad: proporcionar óptima Cobertura de Interiores y Capacidad suficiente para soportar las épocas de mayor tráfico, sin que se produzca una merma de la Calidad de Servicio.

En términos geográficos, existe una limitación en la distancia máxima a la que deben situarse unas Estaciones Base de otras. Para una zona de alta densidad de población como pueden ser el centro urbano de Rota y el resto de zonas urbanizadas, una distancia razonable entre estaciones que permitiera una correcta cobertura de interiores y que soportara la capacidad de tráfico necesaria en la hora cargada se situaría en torno a los 400 - 500 m. En la actualidad, no se cumplen estos criterios en numerosas zonas del casco urbano de la ciudad, encontrando una falta de densificación de estaciones base que produce deficiencias en la prestación del servicio. Conforme se evolucione la red, la distancia entre emplazamientos se disminuirá hasta alcanzar distancias cercanas a 150 – 250 metros para poder ofrecer servicios de muy alta calidad.

5.2.4. NECESIDADES DE MEJORA: NUEVAS UBICACIONES DE ESTACIONES BASE

En cuanto a las necesidades futuras en el término municipal de Rota, es necesaria la implantación de nuevas estaciones base de acuerdo a las siguientes líneas de actuación:

- Despliegue de la red LTE en la ciudad de Rota con el objeto de ofrecer cobertura de exterior en toda la población. Para lograr una cobertura y calidad aceptable en el interior de la mayor parte de la población será necesaria la instalación de una serie de Estaciones Base cuyo estudio se detallará en los puntos siguientes en función de la zona en cuestión. Para poder asegurar una elevada velocidad de transmisión de voz y datos, es necesario un nivel de densificación considerable.

5.2.4.1. Clasificación de las diferentes tipologías de futuras ubicaciones

Las estaciones base de futura implantación que se recogen en el presente expediente se corresponderán con una de las dos tipologías siguientes, siempre en función de las posibilidades de contratación, las catalogaciones del suelo y la adaptación a la normativa municipal. Se distinguirá en función del tipo de construcción entre estaciones base situadas sobre azotea, y estaciones base con antenas adosadas a mástil sobre suelo.

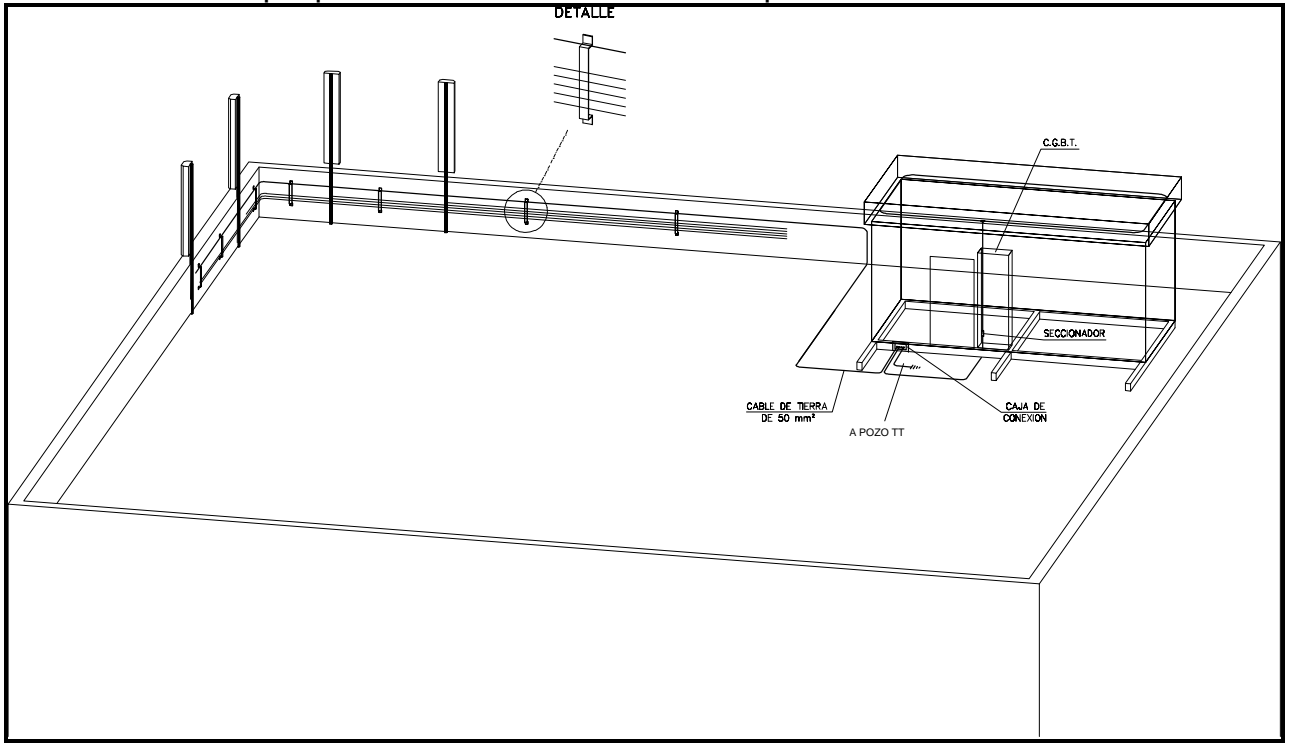
5.2.4.1.1. Tipo 1: Estación Base sobre edificio

El sistema a instalar consta habitualmente de una edificación normalizada que alberga los equipos de radiotelefonía, y una estructura metálica para soporte de las antenas. Dicho soporte se apoyará directamente sobre la cubierta del edificio, respetando en todo momento las condiciones establecidas en la ordenanza municipal. En todos los casos, se establecerán los procedimientos necesarios para minimizar el impacto visual de la instalación.

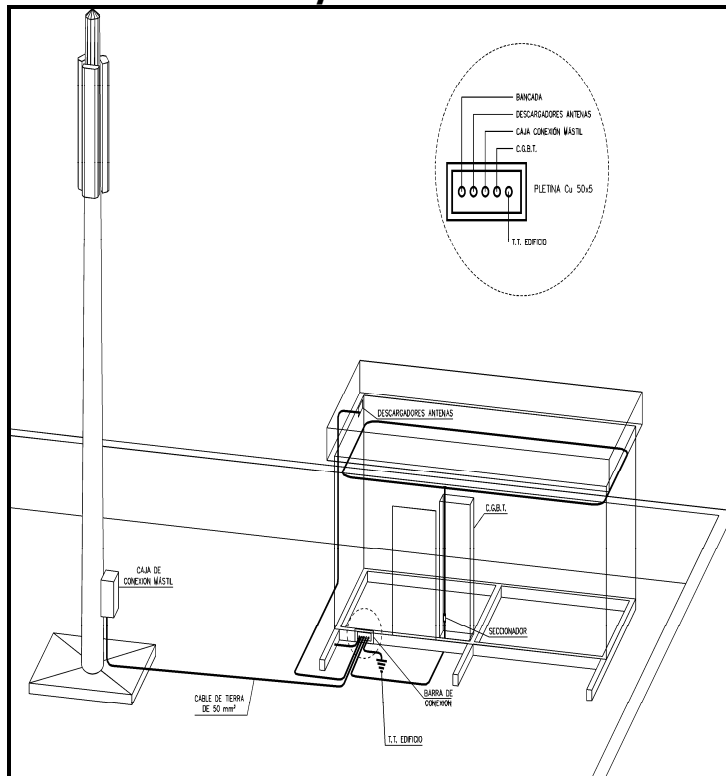
Como elementos asociados para el correcto funcionamiento del sistema, será necesario la conexión de los equipos base ubicados en la edificación con la Red de MV Comunicaciones mediante un Módem o al resto de la Red Móvil mediante un radioenlace que se instalaría alguna de las estructuras soporte. Además se instalarán los elementos de protección necesarios para alimentar todos los equipos a la red de suministro de energía externa, así como los

elementos de medida para consumo de la misma. También serán necesarios elementos para refrigeración de los equipos.

En las siguientes figuras se refleja de forma esquemática los principales elementos de los que puede constar una instalación tipo:



Instalación con soportes tubos individuales



Instalación con soporte crosspolar

En los apartados siguientes se describen de forma orientativa las especificaciones de los distintos elementos que conforman una instalación tipo. Estas especificaciones pueden variar en función de la tecnología, necesidades de servicio, mejoras sobre los mismos por parte de los propios fabricantes y de las características intrínsecas del propio emplazamiento. De este modo, se dispone de una gama mayor de edificaciones, soportes y equipos homologados que los aquí descritos, presentando distintas características en cuanto a dimensiones, capacidad y prestaciones, que permiten una mejor integración de la instalación en su entorno físico cercano.

Características de la Edificación

La caseta está constituida por una estructura de paneles que se realizan mediante chapa metálica galvanizada con un espesor mínimo de 1 mm. La calidad de la chapa de acero satisfará los requisitos de la norma NBE-EA-95 y UNE 36086-1. Todo el conjunto forma un monoblock para obtener unas excelentes características mecánicas y garantizar su transportabilidad.

El forjado de piso y la cubierta se refuerzan con omegas de poliéster para permitir incrementar la rigidez y solidez de la estructura. En el piso, además, se incluye un tablero fenólico revestido con fibra de vidrio para evitar las deformaciones y posibles humedades y poder anclar los equipos.

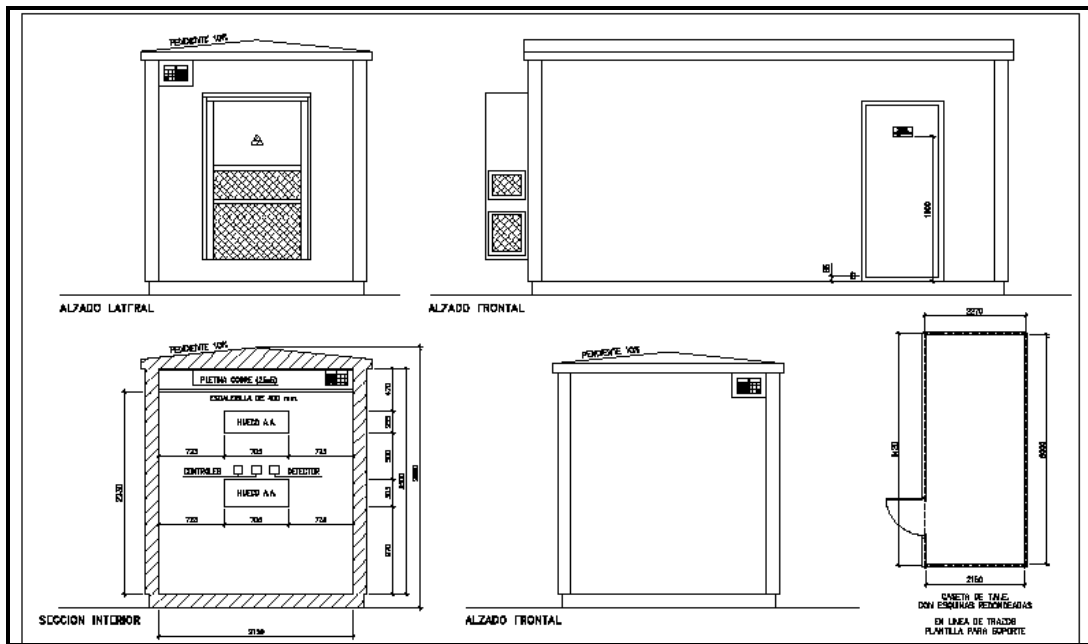
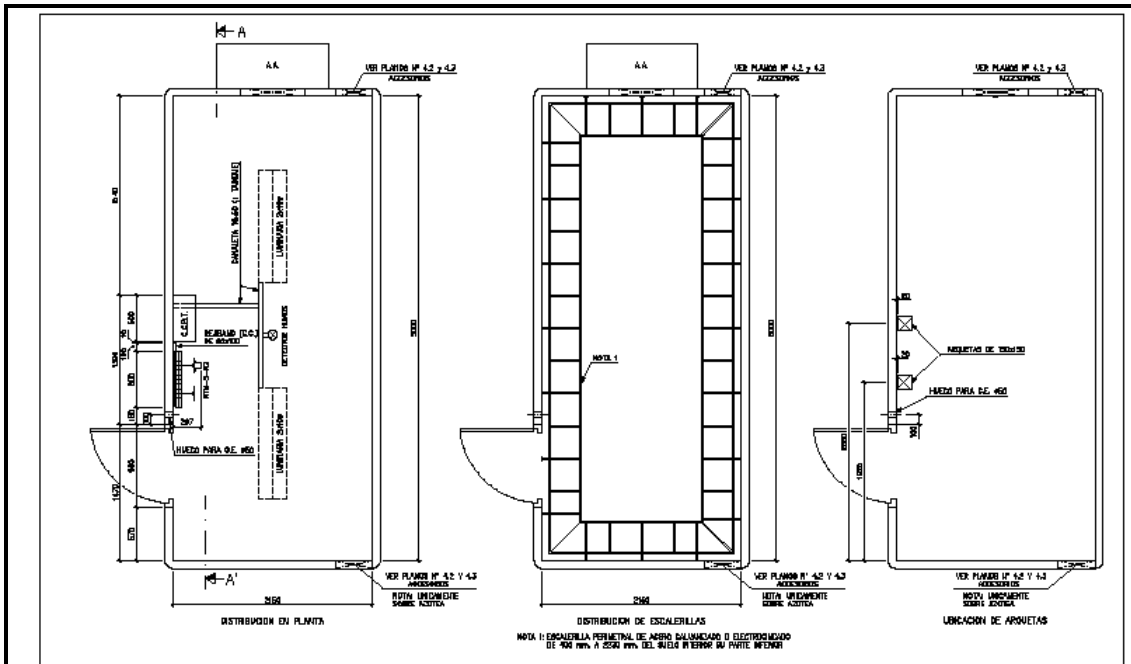
La caseta se apoya sobre una base metálica construida en acero galvanizado en caliente, con refuerzos en las esquinas, que sirve como base y soporte para el anclaje sobre la bancada de estructura metálica de la cubierta.

Las dimensiones exteriores de la caseta son de 5.420 x 2.430 mm por 2.730 mm de alto, e interiores de 5.000 x 2.150 mm por 2.400 mm de alto. La caseta dispone de un acceso de 0,845x2,125 m.

La edificación dispone de las medidas mínimas necesarias para albergar los equipos, tales como cuadro eléctrico, equipo de aire acondicionado, así como los distintos equipos receptores-transmisores.

Las paredes se realizarán mediante paneles tipo Sandwich con objeto de aligerar la envolvente, consiguiendo un factor general de aislamiento $K_g < 0,8$ Kcal / h m² °C. Los paramentos verticales interiores serán lisos y contarán con la suficiente rigidez para soportar las instalaciones ubicadas en ellas.

Se acompañan a continuación los planos de detalles constructivos de la caseta:



Iluminación

La caseta dispone de alumbrado artificial mediante una pantalla fluorescente ubicada en el techo de 2x36 W.

Ventilación

La caseta no precisa ventilación, salvo la necesaria para evacuar o eliminar el calor generado por los equipos, y así mantener la temperatura dentro los límites aceptables para el buen funcionamiento de los equipos electrónicos, entre 20 y 25° C.

Prevención y extinción de incendios

Se dispondrá de un detector de humos iónico, que a través de la correspondiente señal de alarma es transmitida vía radio a la central.

Los equipos móviles de mantenimiento están dotados de extintores adecuados, para poder extinguir el incendio cuando llegan al lugar.

Se considera este sistema más eficaz que disponer los extintores "in situ", que no podrían ser utilizados en caso de no existir personal.

Instalación eléctrica

La potencia de los equipos receptores de energía eléctrica se estima en 13,2 KW. a 380/220 V., a tal efecto se dispondrá de la correspondiente instalación, compuesta por acometida y medida, distribución y receptores.

Acometida y medida

La medida se realizará en los contadores de energía activa y reactiva, que se situará en la fachada o valla exterior del recinto, en el lugar indicado.

Cuadro General de Protección

El cuadro general de distribución será metálico, e irá situado en el lugar indicado en planos, próximo a la acometida.

Constará de un interruptor automático magnetotérmico de corte omnipolar tetrapolar de 50 A.

Para los circuitos derivados contra sobrecargas y cortocircuitos, se instalarán interruptores tipo PIA bipolar o tetrapolar, según el caso.

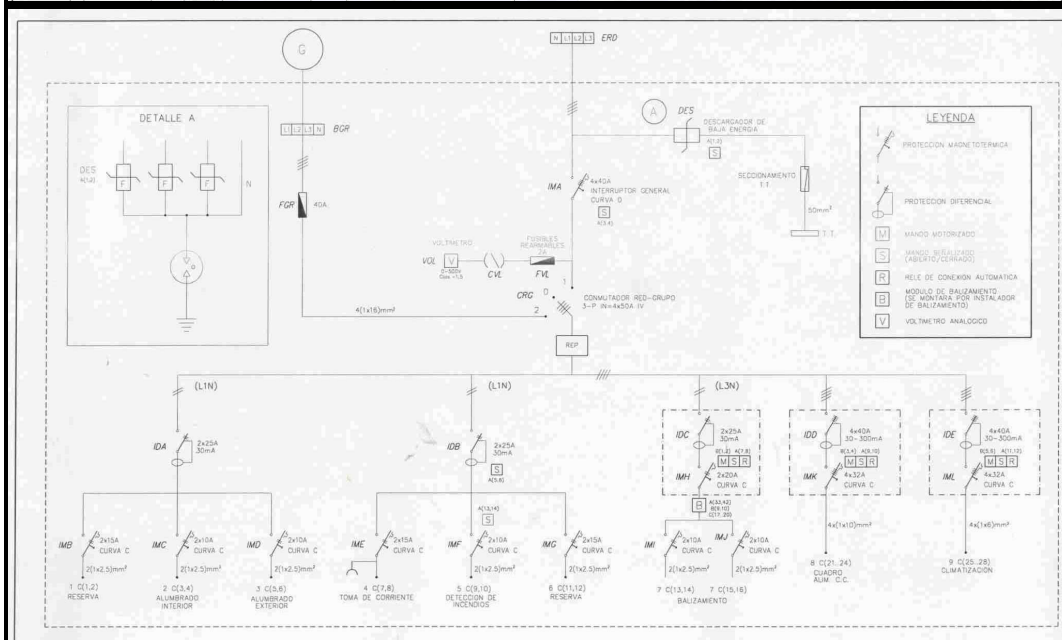
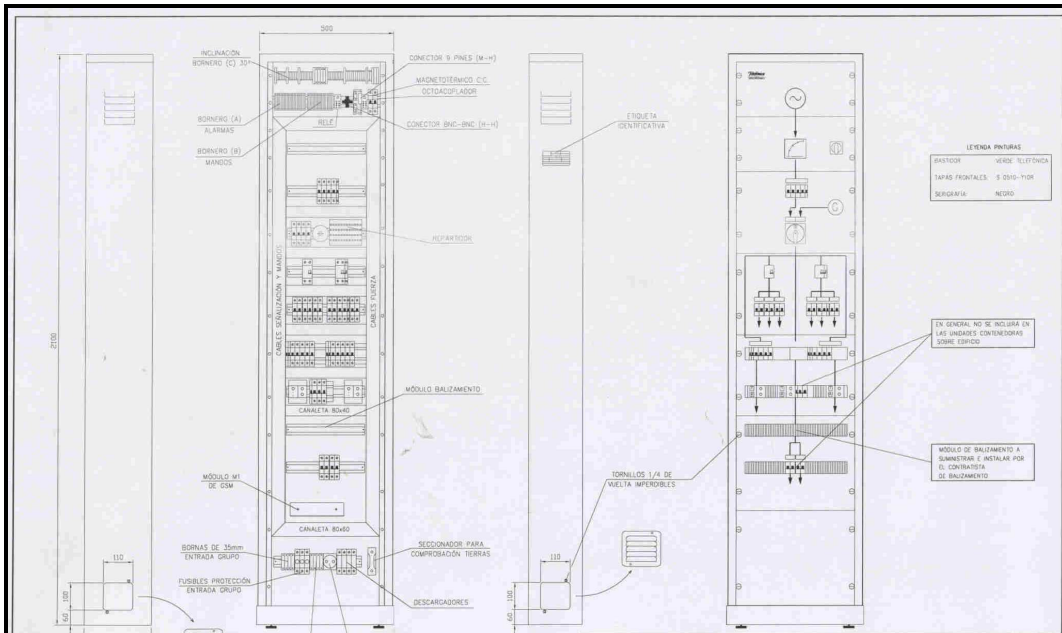
Asimismo para los circuitos que alimenten receptores directamente desde este cuadro, se instalará un interruptores diferenciales II de 25 A. 30 mA., IV de 25 A. y IV por 40 A con sensibilidad 30-300 mA.

Además se dispondrá de un equipo o dispositivo de protección contra sobretensiones, debidamente conectado a su toma de tierra.

El cuadro dispondrá de un conmutador Red-Grupo para en caso de una avería persistente en el suministro de energía eléctrica poder conectar a un grupo electrógeno móvil, que se instalará en el exterior de la caseta.

Se dispone de una línea de alimentación trifásica a la unidad rectificadora, desde la cual se da servicio al cargador de baterías y a los equipos alimentados en corriente continua y otra para alimentación al equipo de Aire Acondicionado.

Las intensidades, calibres y secciones de los circuitos, se indican en el esquema unifilar siguiente, además del croquis del cuadro:



Distribución

Se realizará con conductores V-750 tendidos en canaleta de PVC tipo M1, grapada sobre pared para el caso de los receptores de corriente alterna.

Los conductores de corriente continua, al igual que los conductores de transmisión de señales, estarán tendidos en una bandeja metálica tipo Rejiband de 30 cm de ancho, que se dispondrá próxima al techo de forma perimetral.

Los conductores estarán identificados con los colores, negro, marrón y gris para fases y azul para neutro. Para el conductor de protección o toma de tierra el color será amarillo-verde.

Se intercalarán las cajas de registro y derivación, necesarias para garantizar la buena conexión, ampliación o sustitución de conductores.

Para la distribución a los equipos de la caseta se emplearán conductores de cobre, con aislamiento 0,6/1 KV. multipolares, tendidos sobre canaleta metálica o de PVC con tapa.

Todas las conexiones se efectuarán mediante bornas o clemas con tornillo prisionero.

Toma de Tierra

Las partes metálicas envolventes de equipos eléctricos y accesibles a las personas estarán conectadas a la toma de tierra exterior, así como las grandes masas metálicas. A tal efecto, se dispondrá de un anillo de toma de tierra en el interior de la caseta, realizado con pletina de cobre de 20x5 mm.

La resistencia de difusión a tierra deberá ser tal que en ningún momento los interruptores diferenciales puedan permitir una tensión de defecto superior a 24 V. El valor máximo de la resistencia será, por lo tanto, de $24/0,300=80$ ohmios (se comprobará por medición que el valor real es netamente inferior a éste).

Equipo de Aire Acondicionado

Para garantizar las condiciones de temperatura ambiental en el interior de la caseta, se ha dispuesto la instalación de un equipo de aire acondicionado de frío tipo compacto de condensación por aire, con las siguientes características:

- Capacidad frigorífica total (27°C y 50% en interior y 35°C en exterior): 8.600 f/h (10.803 W), donde f indica frigorías.
- Caudal aire mínima: 1.500 m³/h a 40 Pa.
- Caudal aire máxima: 3.100 m³/h a 40 Pa.
- Resistencia de apoyo: 3 KW.
- Tensión de servicio trifásico/monofásico: 380/230 V.

El equipo consistirá en una unidad compacta en la cual está incluida el compresor, ventilador del condensador, elementos de protección y maniobra. Vienen equipadas con un sistema de ahorro energético (free-cooling) de forma automática cuando las condiciones del aire exterior lo permitan.

El sistema irá regulado y mandado mediante un termostato de ambiente, que se situará en el lugar indicado en planos.

Soporte de antenas

Para fijar las distintas antenas, tanto emisoras como receptoras, es necesario la instalación de unas estructuras metálicas o tubos soporte de antenas, de una altura comprendida entre 4 y 8 metros.

Dichos soportes se anclarán a la estructura del edificio en los pilares del mismo o bien apoyados directamente sobre la cubierta.

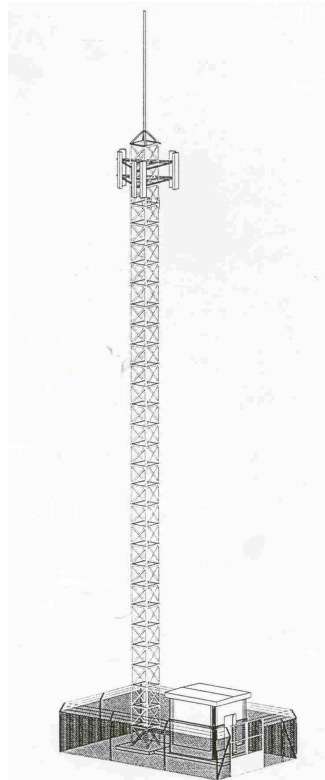
Las características de los soportes en cuanto a altura, ubicación y forma de anclaje, vendrán determinadas por la topología y estructura del edificio.

5.2.4.1.2. Tipo 2: Estación Base sobre suelo

El sistema a instalar consta habitualmente, además de una edificación normalizada para albergar los equipos, de un mástil situado sobre el terreno sobre el que se instalan las antenas necesarias para cubrir los objetivos fijados. Al igual que en el caso anterior, la instalación se ceñirá en todo momento a la ordenanza municipal.

Como elementos asociados para el correcto funcionamiento del sistema, será necesario la conexión de los equipos base ubicados en la edificación con la Red de MV Comunicaciones mediante un Módem o al resto de la Red Móvil mediante un radioenlace que se instalaría en el mástil soporte ya mencionado. Además se instalarán los elementos de protección necesarios para alimentar todos los equipos a la red de suministro de energía externa, así como los elementos de medida para consumo de la misma. También serán necesarios elementos para refrigeración de los equipos.

En la siguiente figura se refleja de forma esquemática los principales elementos de los que consta la instalación:



En los apartados siguientes se describen de forma orientativa las especificaciones de los distintos elementos que conforman una instalación tipo. Estas especificaciones pueden variar en función de la tecnología, necesidades de servicio, mejoras sobre los mismos de los propios fabricantes y de las características intrínsecas del propio emplazamiento. De este modo, se dispone de una gama mayor de edificaciones, soportes y equipos homologados que los aquí descritos, presentando distintas características en cuanto a dimensiones,

capacidad y prestaciones, que permiten una mejor integración de la instalación en su entorno físico cercano.

Características de la Edificación

La caseta está constituida por una estructura de hormigón armado con aislamiento de poliestireno expandido, diseñada para garantizar su transportabilidad.

La caseta se apoyará y anclará sobre una solera de hormigón.

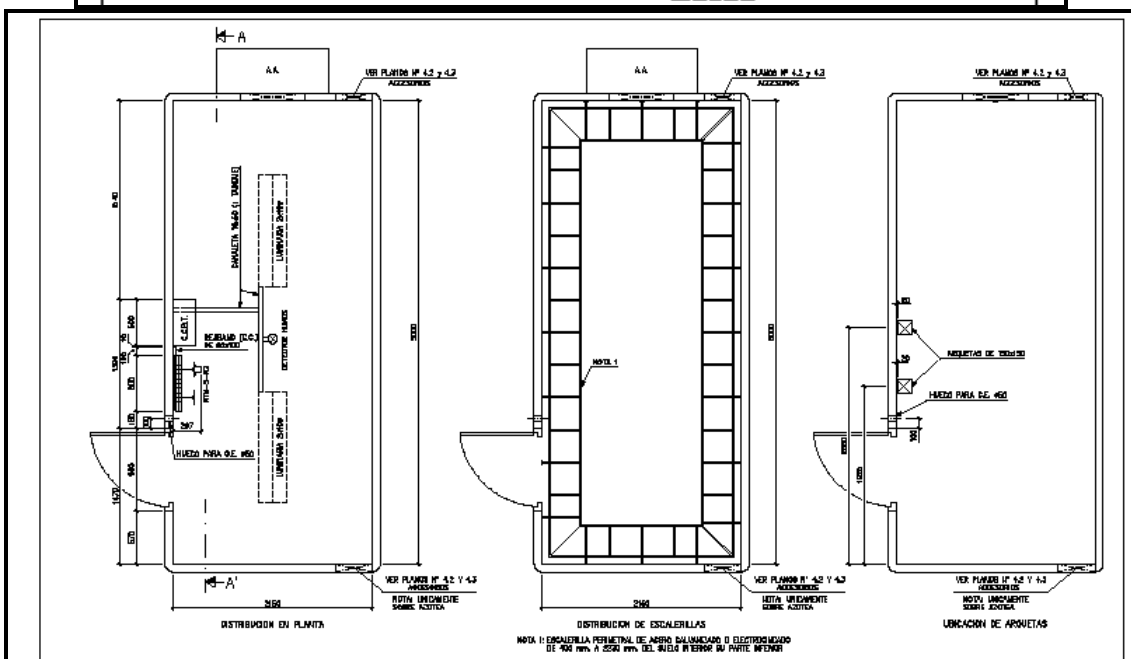
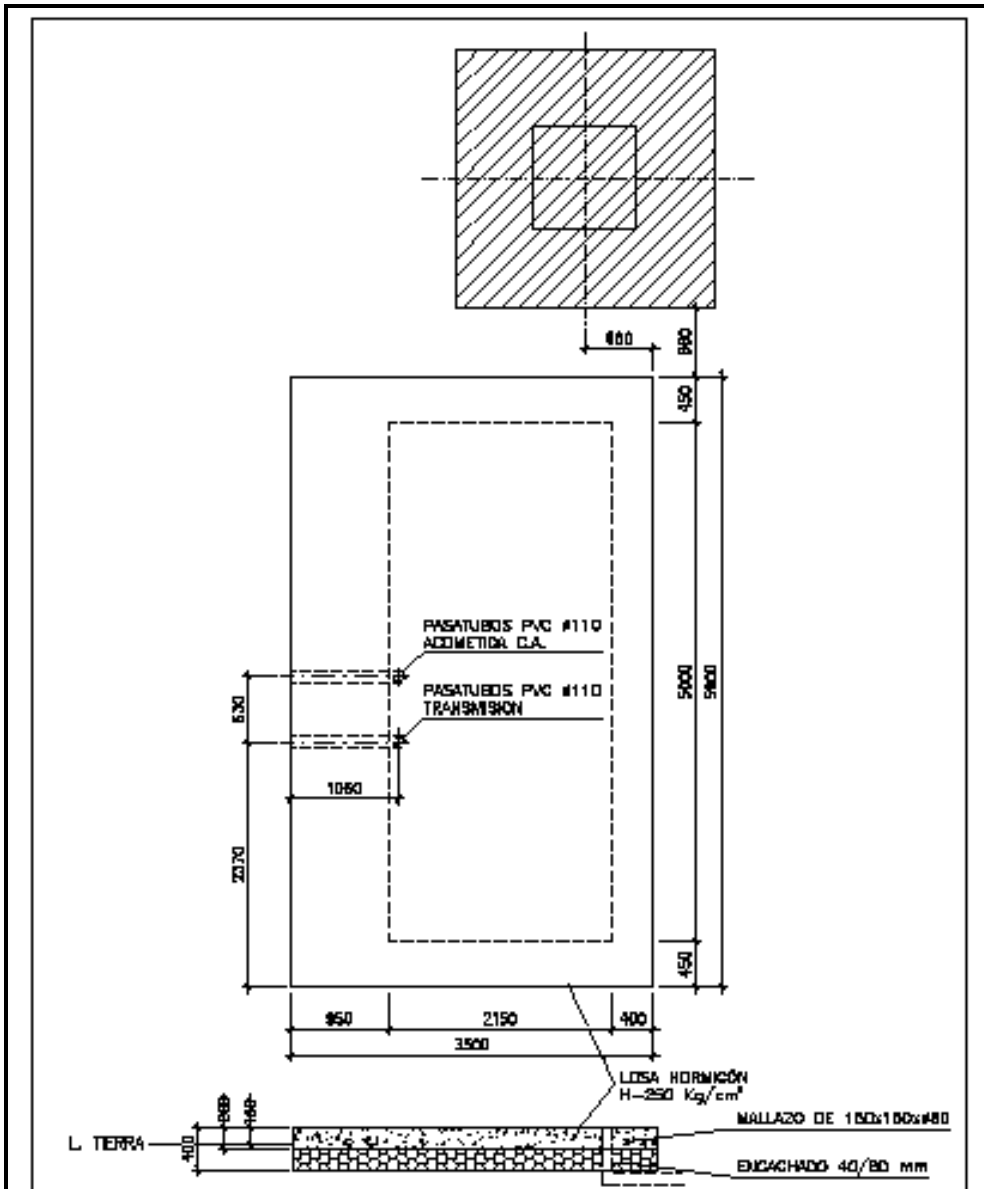
Las dimensiones exteriores de la caseta son de 5.420 x 2.430 mm por 2.730 mm de alto, e interiores de 5.000 x 2.150 mm por 2.400 mm de alto.

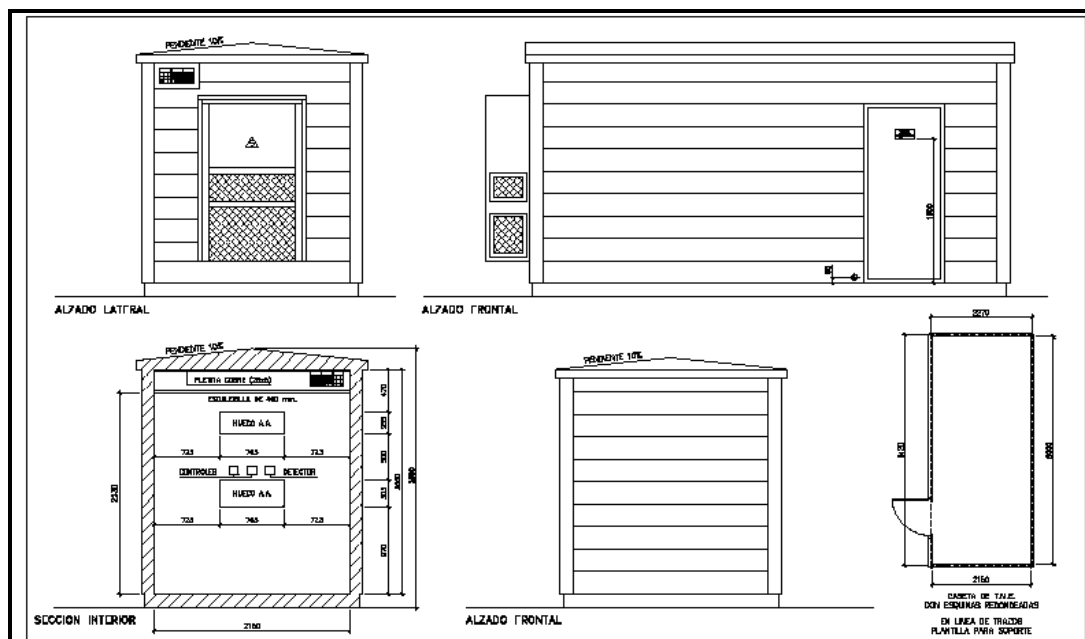
La caseta dispone de un acceso de 0,845x2,125 m.

La edificación dispone de las medidas mínimas necesarias para albergar los equipos, tales como cuadro eléctrico, equipo de aire acondicionado, así como los distintos equipos receptores-transmisores.

Las paredes se realizarán en panel de Sandwich (2 capas de 40 mm), de hormigón armado y capa central de poliestireno expandido (de 60 mm de grosor), consiguiendo un factor general de aislamiento $K_g < 0,8 \text{ Kcal} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Se acompañan a continuación los planos de detalles constructivos de la caseta:





Iluminación

La caseta dispone de alumbrado artificial mediante una pantalla fluorescente ubicada en el techo de 2x36 W.

Ventilación

La caseta no precisa ventilación, salvo la necesaria para evacuar o eliminar el calor generado por los equipos, y así mantener la temperatura dentro los límites aceptables para el buen funcionamiento de los equipos electrónicos, entre 20 y 25° C.

Prevención y extinción de incendios

Se dispondrá de un detector de humos iónico, que a través de la correspondiente señal de alarma es transmitida vía radio a la central.

Los equipos móviles de mantenimiento están dotados de extintores adecuados, para poder extinguir el incendio cuando llegan al lugar.

Se considera este sistema más eficaz que disponer los extintores "in situ", que no podrían ser utilizados en caso de no existir personal.

Instalación eléctrica

La potencia de los equipos receptores de energía eléctrica se estima en 9,9 KW. a 380/220 V., a tal efecto se dispondrá de la correspondiente instalación, compuesta por acometida y medida, distribución y receptores.

Acometida y medida

La medida se realizará en los contadores de energía activa y reactiva, que se situará en la fachada o valla exterior del recinto, en el lugar indicado.

Cuadro General de Protección

Constará de un interruptor automático magnetotérmico de corte omnipolar tetrapolar de 50A.

Para los circuitos derivados contra sobrecargas y cortocircuitos, se instalarán interruptores tipo PIA bipolar o tetrapolar, según el caso.

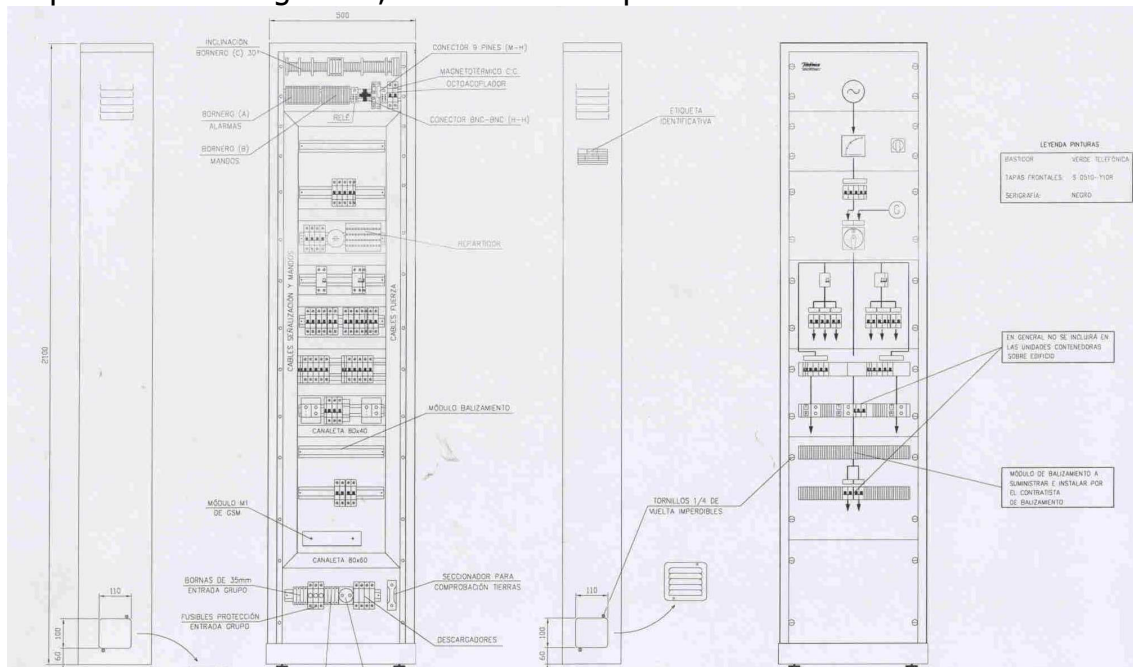
Asimismo para los circuitos que alimenten receptores directamente desde este cuadro, se instalará un interruptores diferenciales II de 25 A. 30 mA., IV de 25 A. y IV por 40 A con sensibilidad 30-300 mA.

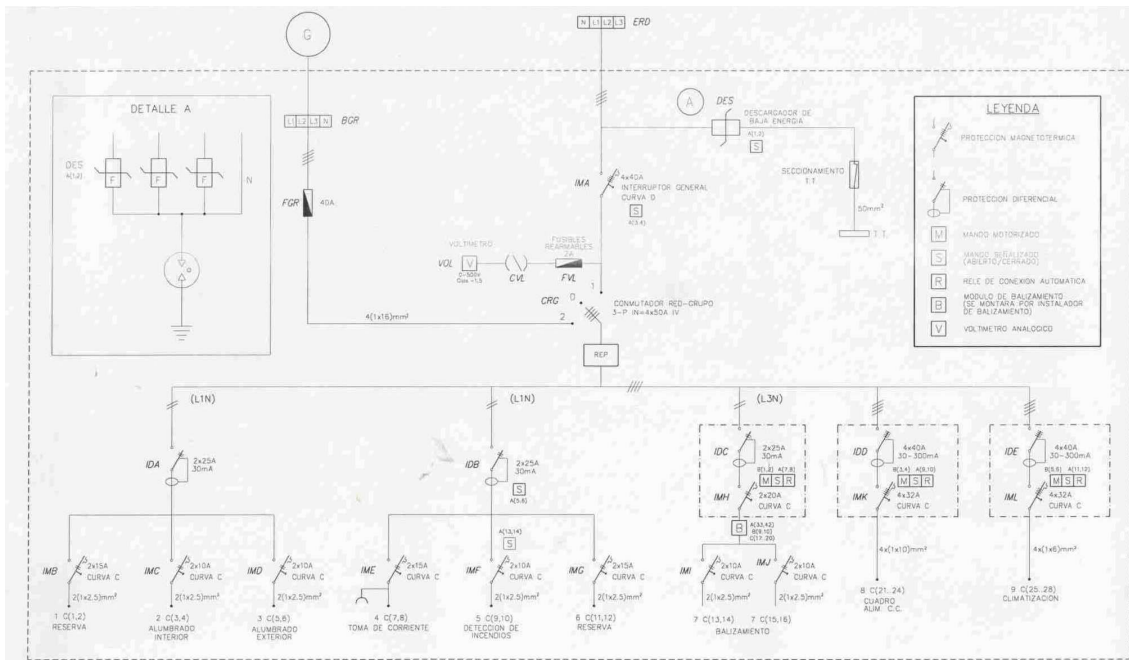
Además se dispondrá de un equipo o dispositivo de protección contra sobretensiones, debidamente conectado a su toma de tierra.

El cuadro dispondrá de un conmutador Red-Grupo para en caso de una avería persistente en el suministro de energía eléctrica poder conectar a un grupo electrógeno móvil, que se instalará en el exterior de la caseta.

Se dispone de una línea de alimentación trifásica a la unidad rectificadora, desde la cual se da servicio al cargador de baterías y a los equipos alimentados en corriente continua y otra para alimentación al equipo de Aire Acondicionado.

Las intensidades, calibres y secciones de los circuitos, se indican en el esquema unifilar siguiente, además del croquis del cuadro:





Distribución

Se realizará con conductores V-750 tendidos en canaleta de PVC tipo M1, grapada sobre pared para el caso de los receptores de corriente alterna.

Los conductores de corriente continua, al igual que los conductores de transmisión de señales, estarán tendidos en una bandeja metálica tipo Rejiband de 30 cm de ancho, que se dispondrá próxima al techo de forma perimetral.

Los conductores estarán identificados con los colores, negro, marrón y gris para fases y azul para neutro. Para el conductor de protección o toma de tierra el color será amarillo-verde.

Se intercalarán las cajas de registro y derivación, necesarias para garantizar la buena conexión, ampliación o sustitución de conductores.

Para la distribución a los equipos de la caseta se emplearán conductores de cobre, con aislamiento 0,6/1 KV. multipolares, tendidos sobre canaleta metálica o de PVC con tapa.

Todas las conexiones se efectuarán mediante bornas o clemas con tornillo prisionero.

Toma de Tierra

Las partes metálicas envolventes de equipos eléctricos y accesibles a las personas estarán conectadas a la toma de tierra exterior, así como las grandes masas metálicas. A tal efecto, se dispondrá de un anillo de toma de tierra en el interior de la caseta, realizado con pletina de cobre de 20x5 mm.

La resistencia de difusión a tierra deberá ser tal que en ningún momento los interruptores diferenciales puedan permitir una tensión de defecto superior a 24 V. El valor máximo de la resistencia será, por lo tanto, de $24/0,300=80$ ohmios (se comprobará por medición que el valor real es netamente inferior a éste).

Equipo de Aire Acondicionado

Para garantizar las condiciones de temperatura ambiental en el interior de la caseta, se ha dispuesto la instalación de un equipo de aire acondicionado de frío tipo compacto de condensación por aire, con las siguientes características:

- Capacidad frigorífica total (27°C y 50% en interior y 35°C en exterior): 8.600 f/h (10.803 W)
- Caudal aire mínima: 1.500 m³/h a 40 Pa.
- Caudal aire máxima: 3.100 m³/h a 40 Pa.
- Resistencia de apoyo: 3 KW.
- Tensión de servicio trifásico/monofásico: 380/230 V.

El equipo consistirá en una unidad compacta en la cual está incluida el compresor, ventilador del condensador, elementos de protección y maniobra. Vienen equipadas con un sistema de ahorro energético (free-cooling) de forma automática cuando las condiciones del aire exterior lo permitan.

El sistema irá regulado y mandado mediante un termostato de ambiente, que se situará en el lugar indicado en planos.

Torre de antenas

Para fijar las distintas antenas, tanto emisoras como receptoras, es necesario la instalación de una torre metálica de celosía o tubular de una altura comprendida usualmente entre los 30 y 40 metros.

Cerramiento

El conjunto de torre y caseta irá vallado mediante un cerramiento de malla simple torsión, cubriendo una superficie aproximada de unos 50 m².

5.2.4.1.3. Características Radioeléctricas Sistemas Radiantes

SISTEMAS RADIANTES

El sistema radiante a instalar consta habitualmente de dos o tres sectores con antenas de panel colocadas sobre un mástil donde se conectan las antenas necesarias para cubrir los objetivos fijados por medio de cable coaxial al equipo.

Las características de las antenas son similares a las del tipo que se indican a continuación [45]:

ELECTRICAL SPECIFICATIONS**BROADBAND 1800 1900 UMTS**

Antenna Model	BG D3-800TV		
Polarization	± 45°		
Frequency	1710 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2170
Horizontal Beamwidth	66°	64°	62°
Vertical Beamwidth	6,5°	6,4°	6°
Gain (dBi)	17,7	18,1	18,2
Vertical Electrical Tilt	VARIABLE 0°-10°	VARIABLE 0°-10°	VARIABLE 0°-10°
Upper Sidelobe Suppression for the 1st lobe above main beam (dB)	17	17	17
Front-to-Back Ratio /Cpol @ ± 20° (dB)	> 30	> 30	> 30
VSWR	< 1,4 : 1	< 1,4 : 1	< 1,4 : 1
Cross Polar Ratio @ ± 60° (dB)	> 10	> 10	> 10
Isolation Between Ports (dB)	> 30	> 30	> 30
Interband Isolation (dB)	> 33 (1710-2170//1710-2170)		
Maximum Power Per Input (W)	250		
Intermodulation (dBc)	< -150		
Impedance (Ω)	50		

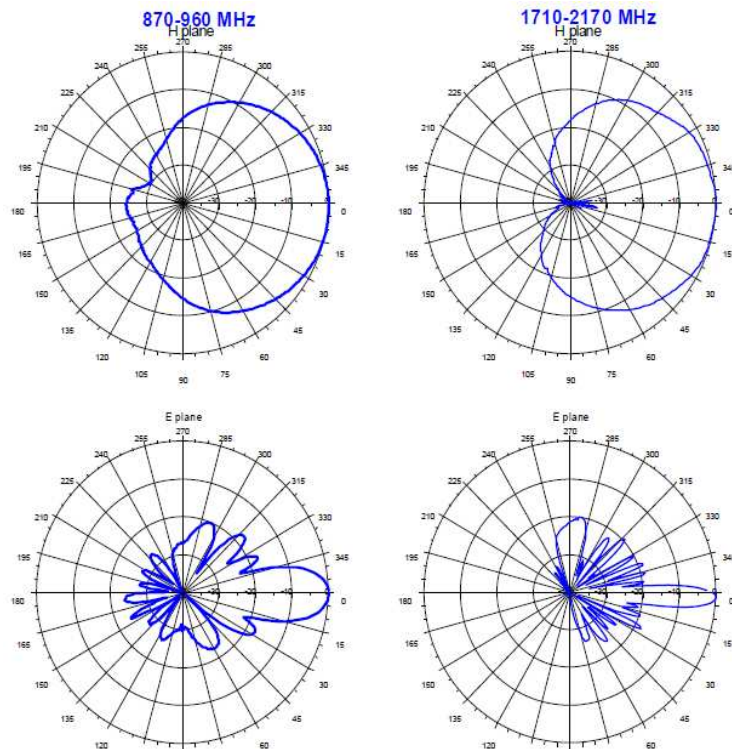
MECHANICAL SPECIFICATIONS

Connectors	4 X 7/16 Female
Connector Position	Bottom
Survival Wind Speed (km/h)	200
Front Windload @ 160 km/h (N)	620
Lateral Windload @ 160 km/h (N)	120
Radome Color	Grey, paintable
Temperature Range (°C)	-55° to +60°
Humidity	100%
Antenna Weight (kg)	16
Antenna Dimension (mm) H X W X D	1340 X 300 X 90

This antenna is available with variable electrical tilt 4°-14°



Las antenas usualmente utilizadas presentan un diagrama del siguiente tipo:



CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS RADIANTES

Un caso general de configuración con tres sectores:

Sistema/Sector/No. Antena transmisora	Polarización	Ganancia (dBi)	Orientación (grados)	Ancho de Haz Horizontal (grados)	Ancho de Haz Vertical (grados)	Angulo de inclinación mecánico (grados)	Angulo de inclinación eléctrico (grados)	Nivel de lóbulos secundarios (dB)	Relación delante-atrás (dB)	Altura de la antena sobre la azotea (m)	Altura de la antena sobre el terreno (m)	Dimensión máxima de la antena (m)
LTE/S1/A1	$\pm 45^\circ$	18,2	0	62	6	3	3	-17	-30	5,5	35	1,34
LTE/S2/A1	$\pm 45^\circ$	18,2	120	62	6	3	3	-17	-30	5,5	35	1,34
LTE/S3/A1	$\pm 45^\circ$	18,2	240	62	6	3	3	-17	-30	5,5	35	1,34

5.2.4.2. Futuras ubicaciones de Estaciones Base

En los apartados siguientes se detallan las necesidades concretas de todo el término municipal, enumerando los emplazamientos de interés para futuras instalaciones. Asimismo, en el anexo I podrá verse la ubicación de cada uno de los emplazamientos, diferenciando entre Estaciones Base Previstas a Corto Plazo y Estaciones Base Previstas a Medio Plazo y las zonas de Planificación de Nueva Estación Base. Es importante destacar que esta planificación es puramente teórica, es decir, se ha realizado sobre plano y teniendo en cuenta puras consideraciones técnicas y necesidades de red, sin embargo, la ubicación final de cada uno de los puntos planificados dependerá de las posibilidades reales de contratación,

adecuación de la instalación a la ordenanza municipal..., aunque siempre se encontrará en el entorno próximo del punto inicialmente planificado para así poder cubrir las necesidades de cada zona objetivo.

5.2.4.2.1. Rota

Se hace totalmente necesaria la implantación de estaciones base en el casco urbano de Rota y zonas colindantes, así como la zona de desarrollo del municipio, ya que se encuentra en situación de despliegue inicial, por lo que existe una falta de densificación de estaciones tal como sería propia de una zona urbana con población densa. Este hecho se agrava en la zona Norte y centro de la ciudad en la que el tipo de edificaciones, la angostura de las calles y la acumulación de población hacen imprescindible la ubicación de un gran número de estaciones base que proporcionen el servicio adecuado.

Por tanto, con el objeto de dotar el servicio MV Comunicaciones en la zona se propone la implantación de nuevas Estaciones Base en los siguientes emplazamientos:

Nombre de Estación Base	Fase	Latitud	Longitud	Altura Edificio / Torre
POLIDEPORTIVO	Fase 0	36°38'3,09"N	6°23'14,13"O	25 m
LA CARBONERA	Fase 0	36°37'58,22"N	6°22'31,15"O	25 m
POLÍGONO PORTALEJO	Fase 0	36°37'52,31"N	6°21'52,31"O	25 m
AVDA DIPUTACIÓN	Fase 0	36°37'24,59"N	6°22,14,78"O	26 m
CHORRILLO	Fase 0	36°37'31,82"N	6°21'19,33"O	26 m
MARÍA AUXILIADORA	Fase 0	36°37'14,17"N	6°21'40,86"O	35 m
ALMADRABA	Fase 1	36°37'43,92"N	6°23'01,24"	15 m
PRÍNCIPES	Fase 1	36°37'27,09"N	6°21'47,05"O	31 m
VIRGEN ANGUSTIAS	Fase 1	36°37'36,03"N	6°21'31,15"O	21 m
PUERTO NAÚTICO	Fase 1	36°37'00,24"N	6°21,27,73"O	25 m
GUADALETE	Fase 2	36°37'43,92"N	6°23'01,24"O	18 m
AVDA MATEA	Fase 2	36°37'27,09"N	6°21'47,05"O	25 m
AVDA SEVILLA	Fase 2	36°37'36,03"N	6°21'31,15"O	33 m
LA COSTILLA	Fase 2	36°37'00,24"N	6°21,27,73"O	24 m
BUENAVISTA	Fase 2	36°37'21,01"N	6°21,31,33"O	23 m

CALVARIO	Fase 2	36°37'19,54"N	6°21'25,66"O	16 m
AMAPOLAS	Fase 2	36°37'22,72"N	6°21'16,72"O	19 m
BALEARES	Fase 2	36°37'36,49"N	6°21'04,21"O	25 m
FALLA	Fase 2	36°37'27,90"N	6°21'34,59"O	25 m
SANTA MARÍA DEL MAR	Fase 2	36°37'02,60"N	6°21'35,74"O	25 m

5.3. Mimetizaciones

5.3.1. Torres de bajo impacto

Existen un sinfín de torres multioperador de bajo impacto visual, como pueden ser torres tubulares, tótem publicitarios, torres de iluminación, etc.

5.3.1.1. Antenas expuestas y cableado interior

En la siguiente solución el cableado es trazado por el interior de la torre tubular, aunque el sistema radiante es visible.



Torre de 30 m
multi-operador con
cables por el interior.



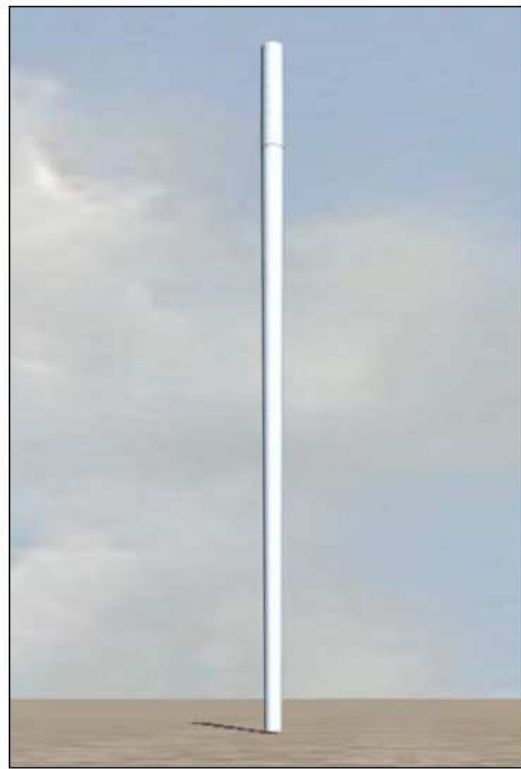
Figura 165. Torres de telefonía convencionales caso real (Centro Hípico)

5.3.1.2. Antenas integradas y cableado interior

En la siguiente imagen se aprecia una solución de muy bajo impacto, ya que la antena está integrada en el soporte y el cableado es interior al mástil [46].



Poste cilíndrico.



Poste cónico inverso.

Figura 166. Torres para antena trisectorial con un nivel de antena

Se trata de un mástil con una antena tipo trisectorial con un solo nivel de antenas. También existe esta solución con tres niveles de antenas.



Figura 167. Estructura para antena trisectorial con tres niveles de antenas

Algunas soluciones tienen formas cilíndricas sobre torre tubular con puertas exteriores para el correcto mantenimiento del sistema radiante [46].



Acceso para
mantenimiento



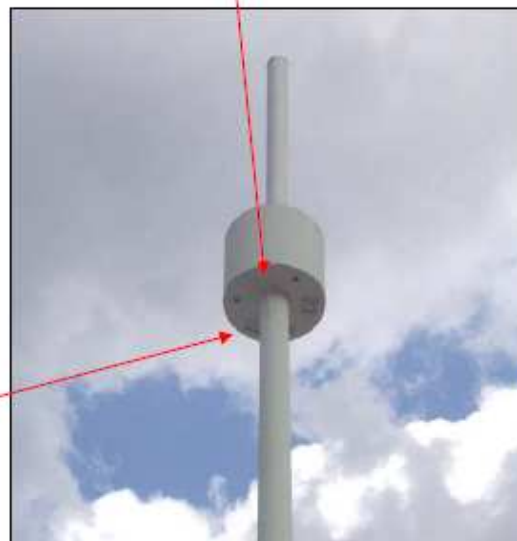
Figura 168. Torre con estructura cilíndrica y puertas para mantenimiento

Soluciones para entornos comercial e industriales [46]:



Antena integrada en punta.

Estructura cilíndrica para radio-enlace y sectoriales



Iluminación mediante reflectores

Figura 169. Antena trisector en zona industrial

Soluciones para entornos deportivos [46]:



**Antenas
mimetizadas
combinadas
con grandes
luminarias**



Figura 170. Antena trisector en mástil cilíndrico

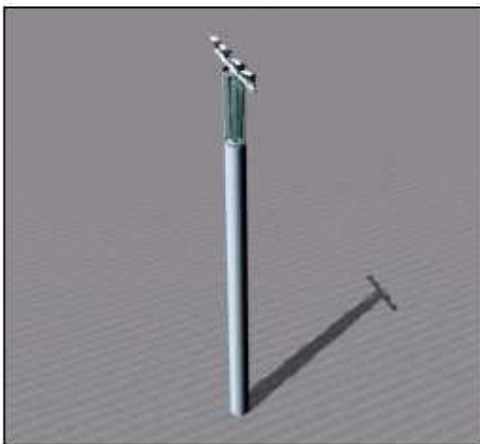


Figura 171. Antenas integrada con iluminación en punta (entornos deportivos)

A continuación se muestra un mástil de fibra de vidrio con antenas mimetizadas en cilindro superior y radioenlace en la raqueta.



Figura 172. Antenas integradas en cilindro publicitario

5.3.2. Torres de iluminación

Se suelen emplear simulaciones tipo torres de iluminación, como se puede observar en la figura siguiente [46]:



Figura 173. Torre de iluminación

La solución anterior, no muy frecuente por su elevado coste, no es la más habitual sino que se instalan torres tubulares con cableado interior y sistema radiante tipo trisectorial con focos por debajo del sistema radiante.

Se muestra una solución de este tipo en un entorno costero, en el que por cambio requerimiento de la propiedad se tuvo que mimetizar el emplazamiento:



Figura 174. Comparativa mástil existente (derecha) y torre de iluminación con antena trisector (izquierda). Provincia de Cádiz. Fotos reales



Figura 175. Antena trisector con iluminación. Provincia de Cádiz. Fotos reales.

5.3.3. Diseños singulares

El bajo impacto visual cobra más importancia cuando se trata de edificios emblemáticos reacios a instalaciones de cualquier tipo de sistema radiante por el gran impacto que ello supone.

Por ello, se han ideado una gran multitud de diseños especiales, como son los siguientes [46]:



Figura 176. Torre de alta capacidad y estructura triposte de fibra de vidrio sobre tejado



Figura 177. Estructuras triposte multi-operador y plataformas elípticas



Figura 178. Estructura decorativa especial. Torre de 65 metros con estructura decorativa (a la izquierda) y torre con logotipo (a la derecha)

La siguiente estructura simula un depósito de agua de 15 metros en plena ciudad.



**Figura 179. Mimetización tipo torre depósito de agua provincia de Cádiz.
Foto real.**

5.3.4. Mástil sobre bancada autoportada.

Además de influir el bajo impacto visual, la dificultad de algunas estructuras tanto sobre cubierta como en suelo, hace que se utilicen cada vez más estructuras autoportadas, ya que ofrecen un tiempo de ejecución menor y porque se basa en una estructura de reparto de carga [31].

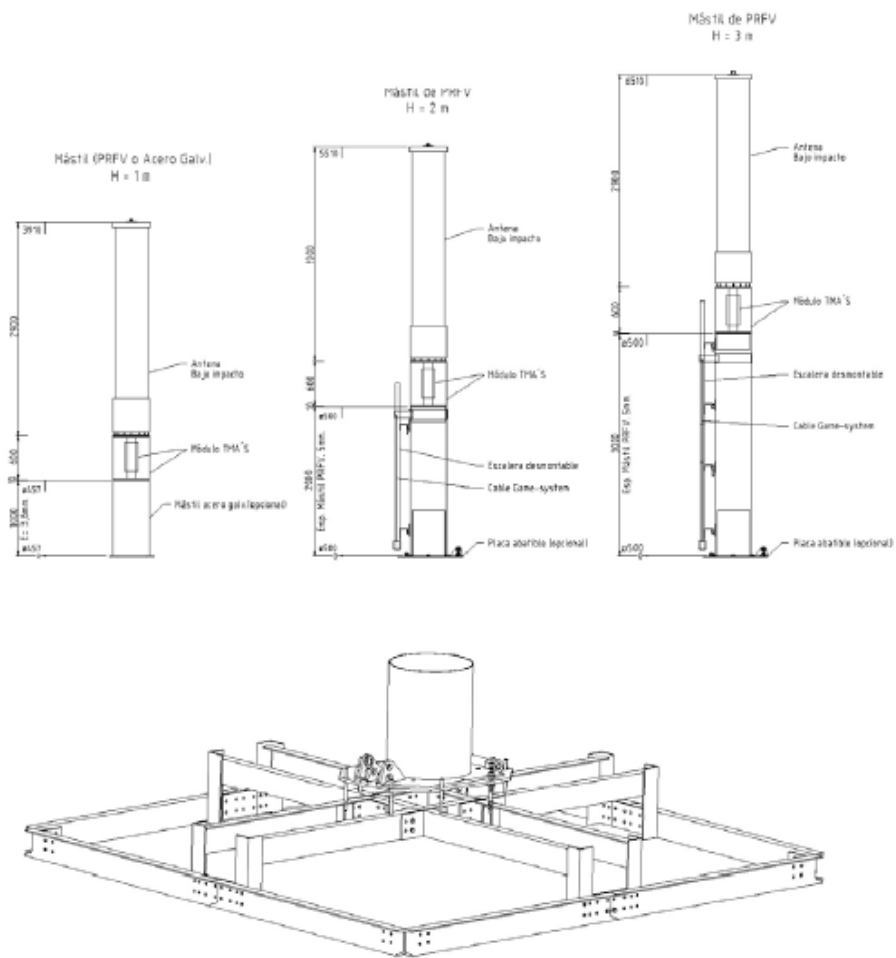


Figura 180. Estructura soporte antena trisector



Figura 181. Antena trisectorial autosoportada con placa abatible

Este tipo de antenas integradas tiene un inconveniente que puede llegar a ser fundamental para que no sea factible su utilización en algunos emplazamientos. Se trata de que el azimut es fijo para las antenas trisectoriales de menor diámetro, es decir, para las de menor impacto visual. Existen variantes con un diámetro mayor y con una variación de $\pm 12,5^\circ$.

En ocasiones, esta limitación en cuanto a orientación de antenas hace que no sea viable emplear este tipo de antenas. Ejemplos claros son emplazamientos costeros en los que área de cobertura se centra prácticamente en 180° salvando el mar, aunque también puede darse el caso en el que el emplazamiento no ofrezca una visibilidad radioeléctrica de 360° , sino que se ve limitada por la existencia de algún obstáculo como pueden ser edificios adyacentes, montañas, etc...

5.3.5. Torre Árbol

Otra solución, pero menos utilizada por su alto coste, son las estructuras tipo árbol entre los que destacan las palmeras y los pinos [31].



Figura 182. Torres árbol 1 [31]



Figura 183. Torres árbol 2 [31]



Figura 184. Torre tipo árbol (palmera). Provincia de Cádiz. Foto real.

5.3.6. Radomos en torres

Los tótem publicitarios, son cada vez más frecuentes [46][31].



Figura 185. Totem publicitarios



Figura 186. Radomos publicitarios

5.3.7. Mimetizaciones sobre cubiertas

Las mimetizaciones de bajo impacto visual y medioambiental más usuales son las que se integran en las cubiertas de los edificios de la ciudad, ya que son los lugares en los que es más frágil visualmente y, por tanto, cobra una mayor relevancia.

Las distintas soluciones son desde chimeneas que llevan en el interior el sistema radiante, hasta las soluciones autosoportadas ya mencionadas, así como estructuras atípicas como depósitos de agua, antenas trisectoriales, etc. Se muestran diferentes soluciones sobre edificios de distintas ciudades:



Figura 187. Comparativa chimenea real (izquierda) y mimetización sistema radiante (derecha). Provincia de Cádiz. Foto real.



Figura 188. Mástil tipo chimenea en Hotel. Provincia de Cádiz. Foto real.



Figura 189. Antena trisectorial. Provincia de Cádiz. Foto real.



Figura 190. Sistema radiante en el interior de depósito de agua. Provincia de Cádiz. Foto real.



Figura 191. Sistema radiante tipo chimenea circular [31]

5.3.8. Ejemplos de montaje

Veamos, algunos detalles de montaje e instalaciones de distintas soluciones mimetizadas.

Antena trisector sobre cubierta:



Figura 192. Construcción mástil trisectorial. Provincia de Cádiz. Foto real.
Depósito de agua:



Figura 193. Torre tipo depósito de agua. Provincia de Cádiz. Foto real.



**Figura 194. Detalle de estructura tipo depósito de agua. Provincia de Cádiz.
Foto real.**

Se puede observar que el cableado irá en el interior de los conductos de PVC instalados en la torre y las antenas irán en el interior del depósito de agua. A continuación se muestra el proceso de construcción de una torre tipo palmera:



**Figura 195. Proceso de construcción de torre palmera. Provincia de Cádiz.
Foto real.**



Figura 196. Izquierda torre mimetizada tipo árbol. Derecha palmeras reales. Provincia de Cádiz. Foto real.

5.3.9. Soluciones mimetizadas para emplazamientos tipo microcelular

No sólo se mimetizan los elementos radiantes de grandes dimensiones, sino que también se han optado por trasladar este tipo de soluciones a antenas para estaciones base tipo microcelular.

Así, podemos mostrar una serie de adecuaciones para antenas del tipo que sigue:

- Antena tribanda omnidireccional de 21 cm de alto [32].



Figura 197. Antena omnidireccional

A continuación se muestran dos soluciones distintas para integrar una antena omnidireccional de estas características.



Figura 198. Solución 1: Tipo farola



Figura 199. Fotografía real de la Solución 1. Provincia de Cádiz.



Figura 200. Solución 2: Tipo iluminación. Provincia de Cádiz. Foto real.

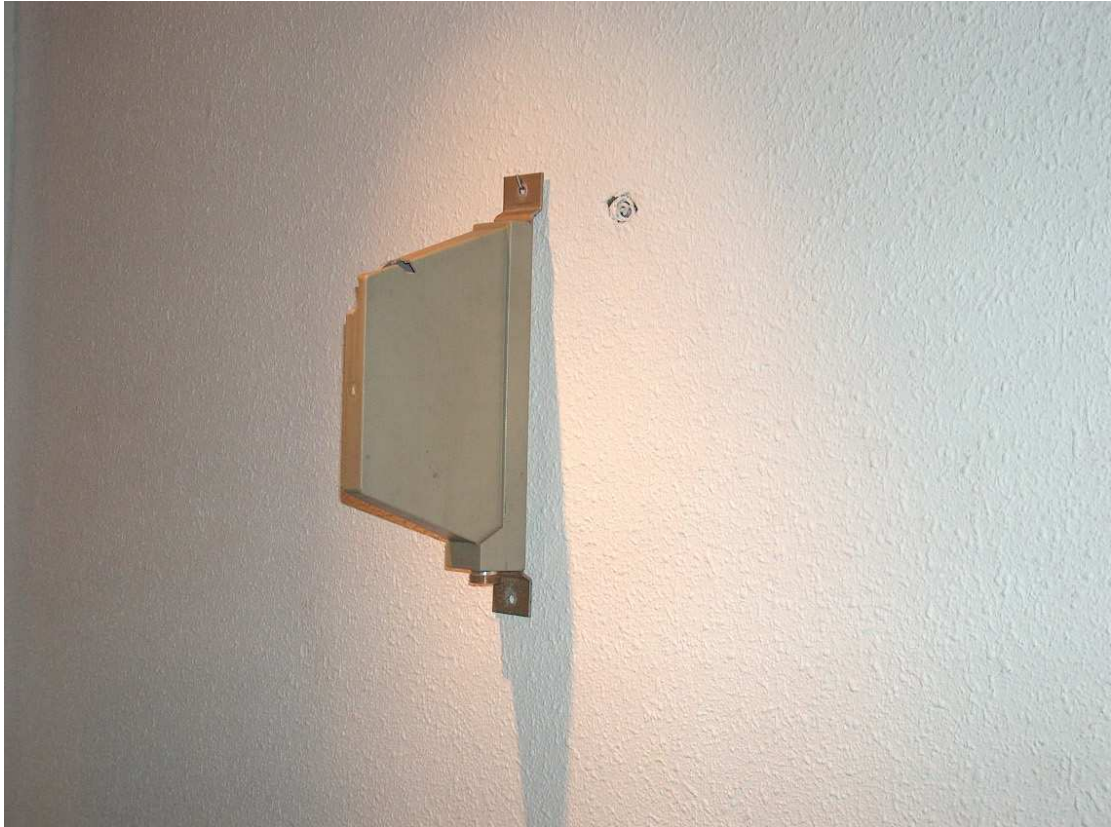


Figura 203. Antena a mimetizar



Figura 204. Adaptación de cartel



Figura 205. Cartel adaptado



Figura 206. Interior de cartel luminoso real (sin adaptación)



Figura 207. Interior de cartel luminoso adaptado



Figura 208. Cartel luminoso adaptado

Capítulo 6 CONCLUSIONES

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones del diseño propuesto

En primer lugar, cabe destacar la importancia de que una herramienta de simulación de coberturas no puede darnos un resultado exacto debido a muchos factores, entre los que podemos destacar los siguientes:

- Error en la ubicación de la Estación Base.
- Situación incorrecta de la antena por posible obstáculo existente.
- Imposibilidad de contratación en el punto diseñado.
- Cartografía incorrectas o antiguas.
- Carencia de mapa morfológico.

Además, el proceso de planificación pasa por diferentes fases, entre las que una de las primeras se corresponde con la asignación de los puntos al Agente de la Propiedad inmobiliaria encargado de contratar un posible candidato. Normalmente, y tras la gran alarma social que se viene prestando por parte de varios organismos y, sobre todo, ciudadanos, el emplazamiento idóneo no suele ser contratado debido a su alto número de vecinos. Cabe destacar que no siempre conviene la contratación de un emplazamiento dominante debido precisamente a los requerimientos de diseño que se han expuesto en el capítulo 4.

Asimismo, una vez contratados los emplazamientos a ser construidos, la puesta en servicio de los mismos se hace con frecuencia de forma paulatina debido a la consecución de las distintas licencias y permisos para acometer la obra pertinente.

Por tanto, las fases de un diseño a través de una herramienta de cálculo son fases teóricas y, probablemente no coincida exactamente con la realidad.

El capítulo 5 hace mención a un plan de implantación de una red de telefonía móvil en un municipio dado, ya que es cada vez más frecuente su necesidad para cumplir con las ordenanzas municipales vigentes.

Asimismo, la labor de optimización tras un encendido o puesta en marcha de una estación base se hace notoria, sobre todo, en el sistema LTE por estar directamente influenciado por la dependencia respecto a la interferencia. Por ello, el optimizador de cada zona debe ajustar los parámetros de diseño a diario y poder con ello estabilizar la interferencia entre las distintas estaciones base. Cabe destacar que este problema se acentúa en el sistema de tercera generación UMTS.

Con todo, el diseño expuesto comprende desde una red básica, con distancias entorno a los 1000 metros hasta una red muy madura con una estación base cada 200 metros aproximadamente.

También merece una especial atención las soluciones particulares de clientes con deficiencias de cobertura y, por tanto con una posible merma en el servicio de los usuarios pertenecientes a la misma área de servicio. Estas soluciones particulares podrán ser distintas opciones, tal y como, se ha mencionado en el capítulo 3 y dependiendo del área de cobertura.

En la figura 148 se aprecia que existe un hueco de cobertura en la zona Este de la ciudad (centrado en la imagen). Si se analiza el tamaño del hueco, tiene una longitud de unos 160 metros.

Los niveles de RSRP esperados, según las simulaciones del capítulo 4, son de unos -96 dBm en el peor de los casos, y por tanto, no se garantiza la cobertura en algunos interiores, máxime cuando las pérdidas por propropagación típica en interiores (con 2 tabiques) es de unos 20dB aproximadamente.



Figura 209. Hueco de cobertura de longitud 169 metros

En la figura 105 se observa que para estas dimensiones se puede optar por una solución tipo microcelular, por lo que para solucionar los problemas de nivel RSRP en dicha zona se propone una microcélula de exterior, ya que implica un coste muy inferior si se compara con el de un diseño macrocelular.

Para casos puntuales, donde el problema de cobertura sea una oficina o vivienda, se puede optar por instalar un equipo Femto-nodo como los que se muestran en el Anexo I. Asimismo, también se puede realizar la instalación de

un equipo repetidor en la banda deseada con el esquema de diseño mostrado en la figura 150.

Los problemas de cobertura en el sistema LTE se dan cuando los niveles de potencia de la señal *Reference Signal* son deficientes o cuando la calidad también se encuentra mermada. Un ejemplo práctico, es el que se muestra en la siguiente figura, donde a través del service mode de cualquier terminal (se activa por medio de un código, que en el caso del terminal Samsung Galaxy S4 Mini es el *#0011#). De esta forma, en la figura 210 se muestra un caso con niveles aceptables (a la izquierda) y una medida con niveles deficientes (a la derecha).

ServiceMode	ServiceMode
LTE RRC: Idle, Band3	LTE RRC: CONN, Band3
EmS: 3, EmSS: 0, MeC: b8	EmS: 3, EmSS: 0, MeC: a0
MCC-MNC : 214 - 07, MeG: 380	MCC-MNC : 214 - 07, MeG: 380
Earfcn_dl: 1321, PCI: 96	Earfcn_dl: 1321, PCI: 19
LTE DL BW : 15MHz	LTE DL BW : 15MHz
RSRP:-91 RSRQ:-8 SNR:9.4	RSRP:-106 RSRQ:-10 SNR:7.8
EUpS: 0, AtCo: 0	EUpS: 0, AtCo: 0
AtReCo: 0, TaAtCo: 0, DeAtCo:	AtReCo: 0, TaAtCo: 0, DeAtCo:
SeReCa: 5, ReCau: 112, DetTy:	SeReCa: 4, ReCau: 112, DetTy:
Service : Available	Service : Available
TAC : 11090	TAC : 11090

Right-hardkey :Back. Please use the Menukey.

Figura 210. Medidas LTE en interiores con Service Mode del terminal Samsung Gaaxy S4 Mini. A la izquierda niveles óptimos RSRP y RSRQ. A la derecha niveles deficientes.

Además, antes de realizar inversiones para ampliar la red existente, se deben estudiar distintos ajustes de red que puedan mejorar los niveles señalados con anterioridad en los huecos de cobertura. Una opción bastante lógica es “jugar” con las inclinaciones de antenas de las estaciones base existente en el caso de que sea factible. Esto ocurre cuando la inclinación de alguna antena es elevado, por lo que el alcance se reduce y por tanto el área de cobertura de esa celda en cuestión es pequeño. De esta forma, si pasamo, por ejemplo, de una inclinación de 8° (bastante inclinado) a 6° seguramente pueda mejorar el nivel de cobertura en los huecos detectados.

En ocasiones, la solución anterior no es factible por varias cuestiones que se han mencionado a lo largo del trabajo, como pueden ser la polución de pilotos, interferencias, los sobrealcances, etc...

La llegada del sistema 4G ó LTE (Long Term Evolution) ha sido clave para el despegue del internet móvil y servicios como transmisión de datos a más de 300 metros de vídeos de alta definición, gracias a la tecnología OFDMA.

En los próximos años se instalarán antenas inteligentes capaces de dirigir el haz principal hacia el usuario que esté conectado en cada momento, pudiendo generar tantos haces independientes como usuarios estén conectados a la célula.

ANEXO I FEMTO-NODO

Otra opción, intermedia, es la aparición de los "Femtonodos LTE". Estos e-nodos son e-nodos de bajo alcance y de reducidas dimensiones (parecido a un router de ADSL actual), con baja potencia de RF que se instala en el hogar de los clientes, o en un pequeño espacio público, y utiliza una conexión de banda ancha a Internet para conectar con la red móvil.

El femto-nodo no solamente se diferencia de los demás tipos de eNodo-B en el tamaño, la potencia y el ámbito de aplicación, sino en que el femto es autoconfigurable, no necesita intervención manual por parte del operador durante la puesta en marcha del nodo.

Dependiendo de dónde se instale y de qué usuarios puedan acceder a él, se pueden definir 2 casos de uso del nodo doméstico:

Femto-Nodo de cobertura: Este nodo se instala en pequeños espacios públicos (como una tienda, un restaurante,...), y puede ser accedido por cualquiera de los clientes del operador que transiten por dicho espacio. El lugar donde se instale debe disponer de una conexión de banda ancha a Internet. Con este nodo el operador consigue cobertura extra en espacios públicos donde antes no tenía cobertura. El propietario del espacio cubierto por el femto mejora la percepción que tienen los clientes de su local, puesto que la cobertura mejora, y además él también se beneficia de la cobertura. Existe movilidad con la Red 2G/3G convencional en modo idle o dedicado según los casos.

Femto-Nodo del hogar: Este nodo se instala en el hogar del cliente que disponga de BA. El acceso al femto es limitado.

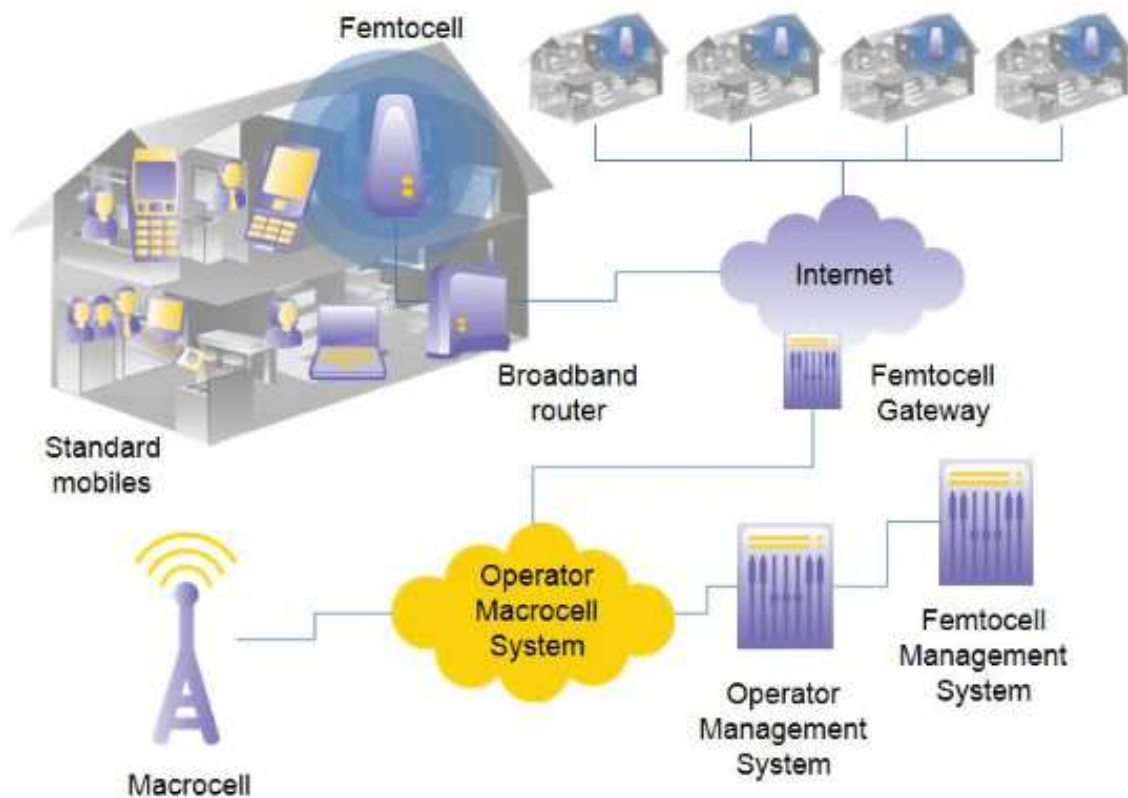


Figura 211. Arquitectura de red Femto.

Como puede verse en el esquema anterior [47], el femto-nodo se conecta al router ADSL que le proporciona la conectividad a Internet necesaria para alcanzar al FGW (Femtocell Gateway).

A continuación se muestra un modelo de Femto-nodo de la marca Huawei [48]:



Figura 212. Modelo de Femto-Nodo

ANEXO II VoIP LTE

La voz sigue siendo muy importante en las comunicaciones y, por tanto, se han desarrollado distintas opciones que hacen que los operadores de red actuales puedan seguir ofreciendo el servicio.

Como ya se ha mencionado en este trabajo, la arquitectura LTE no dispone de un Core Interfaz de conmutación de circuitos, por lo que se soluciona a través de las opciones siguientes [49]:

- *Call Setup FallBack redirection*: en este caso se redirecciona la llamada de voz a través de las redes 2G ó 3G.

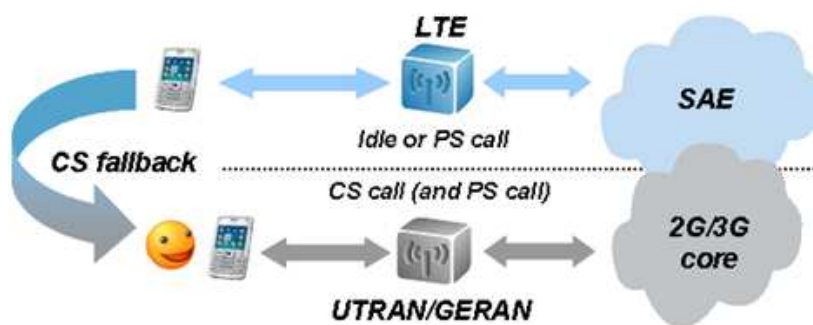


Figura 213. CS FallBack en LTE

- *VoIP + IMS*: la evolución hacia redes de nueva generación basadas en IP es la solución definitiva para las llamadas de voz sobre redes LTE. Una solución intermedia y de adaptación hasta la plena integración IMS es el conocido como *Fast-Track VoLTE*. Dicha solución es la transición entre las redes convencionales y la red todo IP basadas en el núcleo IMS (*all-IP*).

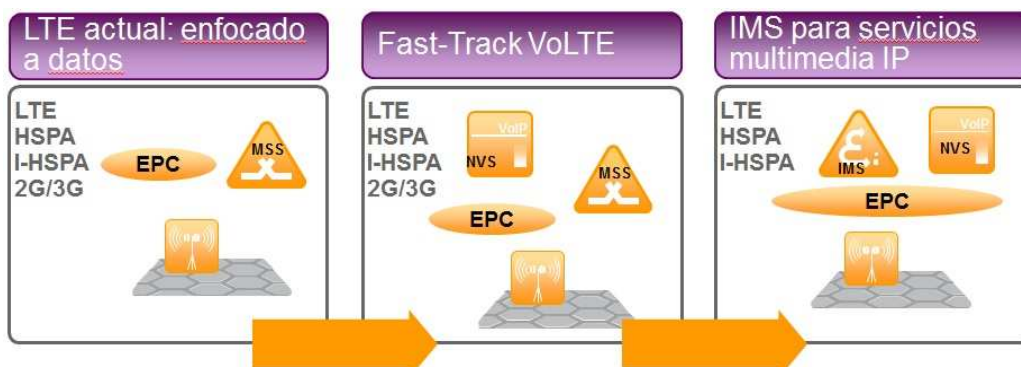


Figura 214. Evolución LTE y llamadas de voz

ANEXO III LTE-Advanced. 5G

LTE-Advanced es la evolución de LTE que se basa en mejoras tecnológicas como pueden ser la disponibilidad de más espectro radioeléctrico, el transporte por fibra óptica, mejoras en el uso de MIMO, el uso de *Smallcells*, la utilización de múltiples bandas y amplificadores distintos, etc...

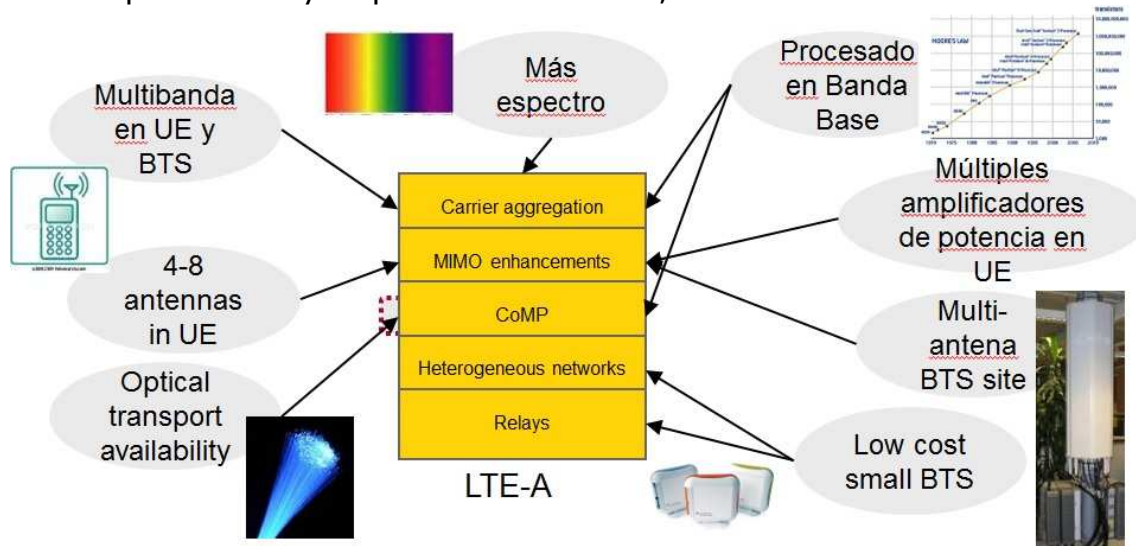


Figura 215. Mejoras introducidas con *LTE-Advanced*

A continuación se muestran las distintas mejoras introducidas:

- *Carrier Aggregation*: es una funcionalidad que permite el uso de hasta 100MHz de ancho de banda pudiendo ser en banda separadas e incluso de forma asimétrica en UL/DL (*uplink/downlink*):



Figura 216. Carrier Aggregation

- MIMO: la evolución del MIMO permite incrementar la multiplexación espacial hasta 8x8 en el enlace descendente y 4x4 en el enlace ascendente.



Figura 217. Mejora del MIMO

- *Coordinated Multipoint*: se basa en la cooperación entre antenas de distintos sectores e incluso estaciones base distintas. De esta forma, mejora la interferencia y se hace un uso más eficiencia de la potencia disponible.



Figura 218. Coordinated Multipoint

- *Relaying*: el empleo de re-transmisiones abarata el coste de la red a la vez que acelera el despliegue de la misma.



Figura 219. Relaying

- *Redes heterogéneas*: distribuidas a través de múltiples tecnologías de acceso radio. Hace referencia al área de cobertura, desde una red macrocelular hasta una picocelda o incluso un acceso local. El uso de varias tecnologías de acceso mejora la eficiencia.

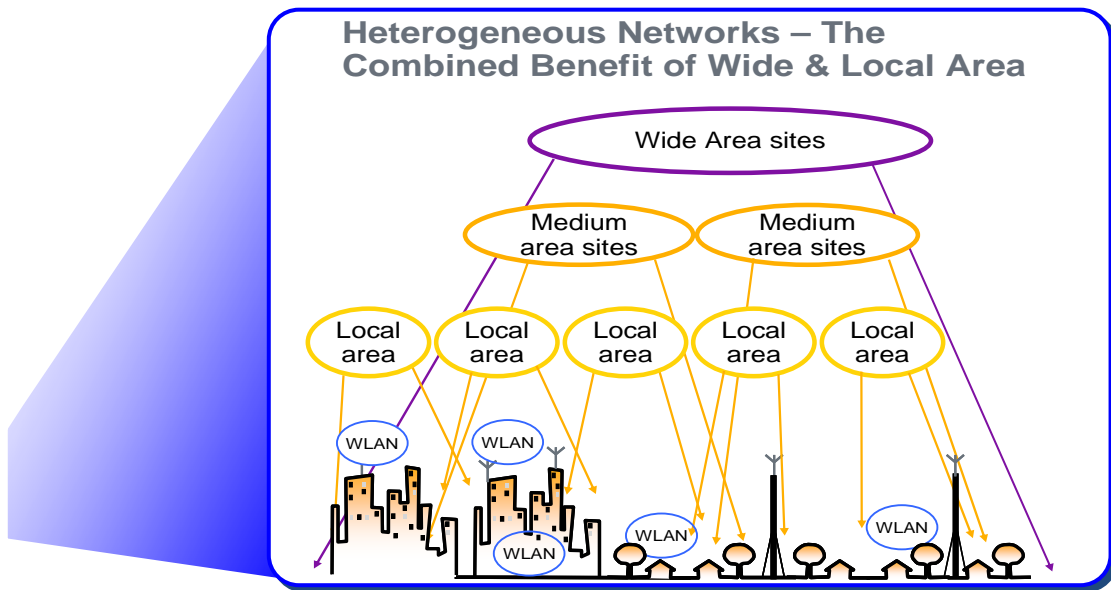
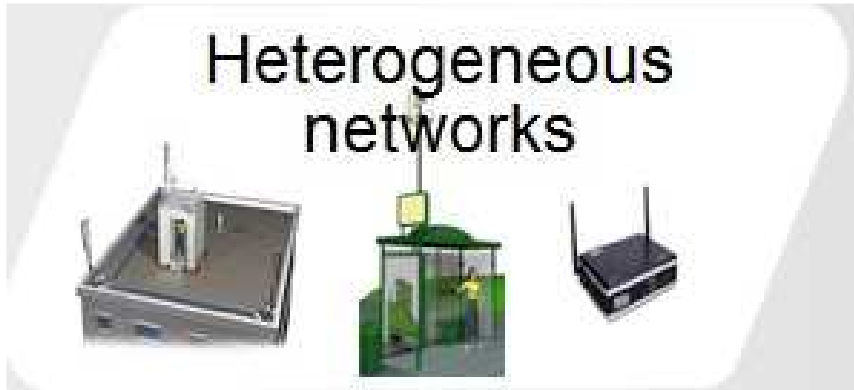


Figura 220. Redes heterogéneas

Referencias bibliográficas:

- [1] IMT-2000
- [2] Workshop Nokia, Septiembre 2009 (Sevilla)
- [3] Rohde&Schwarz. "UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction". Año 2008.
- [4] Agilent. "3GPP Long Term Evolution: System Overview, product development and test challenges". Junio 2009.
- [5] Alcatel-Lucent. "Wireless Network Evolution. LTE Technology". Mayo 2011.
- [6] <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/e/e5/AnexoFG-Marcomun.pdf>
- [7] Harri Holma & AnttiToskala. "LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMAbased radio access". 2009 John Wiley&Sons, Ltd.
- [8] Ramón Agustí Comes, Francisco Bernardo Álvarez, Fernando Casadevall Palacio, Ramón Ferrús Ferre, Jordi Pérez Romero y Oriol Sallent Roig. "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles". Fundación Vodafone España. Año 2010.
- [9] EventHelix.com. "3GPP LTE Channels and MAC Layer". Año 2009.
- [10] http://es.wikipedia.org/wiki/Correcci%C3%B3n_de_errores_hacia_adelante
- [11] http://es.wikipedia.org/wiki/Automatic_Repeat_Request
- [12] Diógenes Marcano. Atel Asesores. "LTE: Long Term Evolution" Octubre 2009
- [13] Erik Dahlman, Stefan Parkvall y Johan Sköld. "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband". Ed Elsevier Ltd. Año 2011.
- [14] Elisa Romea Ordorica. "Estudio de la degradación equivalente de ruido en receptores de DVB-T". Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Abril 2011.
- [15] José Mauricio Vergara González. Tesis de Grado "Simulación de un Esquema de Modulación/Demodulación OFDM utilizando un modelo de canal multitrayectoria". Escuela Superior Politécnica del Litoral. Año 2008.
- [16] Marcos Alsinella Fernández. "PFC Implementación de técnicas de estimación y sincronización para sistemas OFDM". Universitat Autònoma de Barcelona. Septiembre 2008.

- [17] Cesar V. Vargas, Wilson E. López y Carlos F. da Rocha. "Sistemas de Comunicación Inalámbrico MIMO-OFDM". Grupo de Investigación en Comunicaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Santa Catarina. Junio 2007.
- [18] Víctor Torres, Fermín Esparza y Francisco Falcone. "Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE". Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Pública de Navarra. Año 2008.
- [19] Fanny Mlinarsky. Octoscope. "LTE Physical Layer Fundamentals and Test Requirements". Techonline EE Times. Diciembre 2009.
- [20] Ignacio Berberana. "LTE desde el punto de vista técnico: un par de apuntes". Artículo publicado en el boletín interno de Telefónica eKiss nº66.
- [21] Agilent Technologies. "LTE and the Evolution to 4G wireless". John Wiley&Sons, Ltd. Año 2009.
- [22] XIXIA. "SC-FDMA Single Carrier FDMA in LTE". Rev A Noviembre 2009.
- [23] Silvina A. Grupalli, M.A. Cabrera, J.D. Bilbao y M.G. Ferreyra. "Sistemas de comunicación inalámbricos con tecnología MIMO". Dpto. de Electricidad, Electrónica y Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Año 2011.
- [24] Redes de Área Local Inalámbricas "Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College".
- [25] Rohde&Schwarz "Introduction to MIMO". Julio 2009
- [26] Motorola. White Paper "A Practical Guide to WiMax Antennas: MIMO and Beamforming Technical Overview". Año 2007.
- [27] Universidad Autónoma de Madrid. Temas avanzados en Comunicaciones. "Introducción a los sistemas de múltiples antenas". Curso 2007-2008.
- [28] División de Relaciones Corporativas y Comunicaciones de Telefónica I+D. "Las Telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información". Febrero 2005.
- [29] Jim Zyren. White Paper "Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer". Julio 2007.
- [30] Alcatel-Lucent. "Downlink Air Interface Structure (3GPP)". Año 2008.
- [31] Moyano. Catálogo de antenas 2010. www.moyano.com

- [32] Kathrein. Catálogo de antenas 2009. www.kathrein.com
- [33] Amphenol-Jaybeam. www.amphenol-jaybeam.com
- [34] Commscope-Andrew. www.commscope.com
- [35] Telnet. www.telnet-ri.es
- [36] Huawei. www.huawei.com
- [37] Transmisión por Radio. José María Hernando Rábanos & <http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/ID016.pdf>
- [38] Herramienta de simulaciones URANO.
- [39] Observa Mobile (Helios). www.observamobile.com
- [40] www.nsn.com
- [41] Workshop Alcatel Lucent, febrero 2013, Sevilla.
- [42] 3GPP. TS36.101
- [43] <http://www.minetur.gob.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/2013/documents/leygeneraltelecomunicaciones.pdf>
- [44] <http://www.boe.es/boe/dias/2014/05/10/pdfs/BOE-A-2014-4950.pdf>
- [45] www.rymsa.com
- [46] Pesa Euro poles. "Soluciones de integración en el medio".
- [47] Femto Forum:
http://www.3g4g.co.uk/SmallCells/Femtocells_Standards_1102_FemtoForum.pdf
- [48] www.huawei.com
- [49] Roadshow Movistar Septiembre 2014. Madrid.
- [50] Jaume Anguera, Carles Puente, and Carmen Borja, "A Procedure to Design Stacked Microstrip Patch Antenna Based on a Simple Network Model". Microwave and Optical Technology Letters, vol.30 n°3 pp.149-151 August 2001.
- [51] Jaume Anguera, Carles Puente, Carmen Borja, Gisela Font, and Jordi Soler "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas", Microwave and Optical Technology Letters, vol.31, n°3, pp.185-188, Nov 2001.

[52] Jaume Anguera, Carles Puente, Carmen Borja, Nicolás Delbene, and Jordi Soler, "Dual frequency broadband stacked microstrip patch antenna", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters vol.2, pp. 36-39, 2003

[53] Jaume Anguera, Gisela Font, Carles Puente, Carmen Borja, and Jordi Soler, "Multifrequency Microstrip Patch Antenna using Multiple Stacked Elements", IEEE Microwave and Wireless Component Letters, vol.13, nº3, March 2003.

[54] Jaume Anguera, Carles Puente, Carmen Borja, and Jordi Soler, "Dual Frequency BroadBand Stacked Microstrip Antenna Using a Reactive Loading and a Fractal-Shaped Radiating Edge", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters vol.6, pp. 309-312, 2007.

[55] Jaume Anguera, Carles Puente, and Carmen Borja, "Dual Frequency Broadband Microstrip Antenna With a Reactive Loading and Stacked Elements", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 10, 1-10, 2009.

ÍNDICE FIGURAS

<i>Figura 1. Mapa de foros de estandarización en el mundo</i>	19
<i>Figura 2. Evolución velocidad pico según distintos Releases</i>	24
<i>Figura 3. Capas de Arquitectura de Red</i>	26
<i>Figura 4. Arquitectura de red UMTS</i>	26
<i>Figura 5. Planos del CN</i>	27
<i>Figura 6. Núcleo de Red</i>	28
<i>Figura 7. Servidor MSC-S</i>	28
<i>Figura 8. Servidor SGSN</i>	29
<i>Figura 9. Servidor GGSN</i>	29
<i>Figura 10. Interfaces UMTS</i>	30
<i>Figura 11. Modo TDD y FDD</i>	31
<i>Figura 12. Espectro Radioeléctrico en España</i>	31
<i>Figura 13. Arquitectura E-UTRAN</i>	33
<i>Figura 14. Arquitectura de red 2G/3G</i>	34
<i>Figura 15. Arquitectura de red LTE</i>	34
<i>Figura 16. Subportadoras</i>	37
<i>Figura 17. Arquitectura en cuatro dominios básicos</i>	39
<i>Figura 18. Distintas conexiones del eNodeB</i>	42
<i>Figura 19. Conexiones lógicas del eNodeB</i>	44
<i>Figura 20. Conexiones del S-GW a los nodos lógicos adyacentes</i>	45
<i>Figura 21. Conexiones del P-GW con otros nodos lógicos</i>	47
<i>Figura 22. Conexiones del PCRF con otros nodos lógicos</i>	48
<i>Figura 23. Elementos de la arquitectura</i>	50
<i>Figura 24. Acoplamiento con los interfases genéricos</i>	52
<i>Figura 25. Control de la movilidad</i>	53
<i>Figura 26. Arquitectura para el interconexiónado en CDMA2000 HRP</i>	54
<i>Figura 27. Diagrama para cada tipo de acceso</i>	56
<i>Figura 28. Reconstrucción de un paquete sin errores</i>	57
<i>Figura 29. Transmisión continua para un usuario</i>	57
<i>Figura 30. Timing LTE HARQ para un único paquete en downlink</i>	58
<i>Figura 31. Timing Advance</i>	58
<i>Figura 32. Ajuste de potencia</i>	59
<i>Figura 33. Scheduling en el dominio temporal</i>	63
<i>Figura 34. Canal para dos usuarios</i>	63
<i>Figura 35. Arquitectura para el scheduling en LTE</i>	64
<i>Figura 36. Adaptación dinámica</i>	66
<i>Figura 37. Esquema funcional para ICIC</i>	69
<i>Figura 38. Reuso de frecuencias LTE</i>	70
<i>Figura 39. Ciclo DRX</i>	72
<i>Figura 40. Comparación OFDM y FDM</i>	73
<i>Figura 41. Propagación multitrayecto</i>	74
<i>Figura 42. Señal por distintos caminos</i>	75
<i>Figura 43. Canal inalámbrico</i>	77
<i>Figura 44. Transformada de Fourier de un pulso</i>	77
<i>Figura 45. Modulación señal sinusoidal con un pulso digital</i>	78
<i>Figura 46. Transmisión simultánea de varias señales FDM y OFDM</i>	78
<i>Figura 47. Varias portadores ortogonales</i>	79
<i>Figura 48. Esquema implementación OFDM</i>	80
<i>Figura 49. Transformada de Fourier</i>	82
<i>Figura 50. Transformada de Fourier tiempo discreto</i>	83
<i>Figura 51. Transformada rápida de Fourier</i>	84
<i>Figura 52. Prefijo cíclico</i>	84

Figura 53. Desvanecimiento de entrada / salida en símbolos OFDM	85
Figura 54. Símbolo OFDM sin y con prefijo cíclico	86
Figura 55. Constelaciones 4QAM, 16 QAM y 64QAM	87
Figura 56. Error Vector Magnitude	88
Figura 57. Constelaciones QPSK y 16QAM	89
Figura 58. Constelación 64QAM	89
Figura 59. Modulación y demodulación OFDM	90
Figura 60. Subportadoras e información de usuario	91
Figura 61. Diferencia entre OFDM y OFDMA	91
Figura 62. Distorsión con señal entrada elevada	93
Figura 63. Grupo de señales individuales y ortogonales	94
Figura 64. Esquema de modulación OFDMA y SC-FDMA	95
Figura 65. Transmisor y receptor OFDMA	96
Figura 66. Mapeo localizado	97
Figura 67. Mapeo distribuido	98
Figura 68. Mapeo de DFT	98
Figura 69. Mapeo distribuido de SC-FDMA en el dominio del tiempo	99
Figura 70. Esquema SC-FDMA para varios usuarios	99
Figura 71. SISO	101
Figura 72. MISO	102
Figura 73. SIMO	102
Figura 74. MIMO	102
Figura 75. Diversidad por selección	103
Figura 76. Diversidad de conmutación	104
Figura 77. Diversidad por combinación	104
Figura 78. Comparativa diversidad por conmutación o combinación	104
Figura 79. Diagrama de bloques de un transmisor con STC	105
Figura 80. Multiplexación espacial	106
Figura 81. Diferencia entre STBC y SM	107
Figura 82. Beamforming	107
Figura 83. Señal multicamino (en rojo) y señal primaria (en azul)	108
Figura 84. Señal primaria y multicamino con desfase de 180°	109
Figura 85. Escenario multicamino	109
Figura 86. Funcionamiento MIMO	110
Figura 87. Concepto básico MU-MIMO	112
Figura 88. Canal MIMO	112
Figura 89. Esquema transmisor	116
Figura 90. Esquema receptor	117
Figura 91. Trama. Intervalos de tiempo	118
Figura 92. Trama LTE	119
Figura 93. Resource Block	120
Figura 94. Conjunto de anchos de banda LTE	121
Figura 95. Subportadora central	121
Figura 96. Señales de referencia con una sola antena transmisora	123
Figura 97. Señales de referencia con 2 antenas	123
Figura 98. Señales de referencia con 4 antenas	123
Figura 99. Grupos de trabajo y actividades relacionadas	126
Figura 100. Instalación tipo	127
Figura 101. Actividades en la planificación	127
Figura 102. Fotografía con 2 candidatos	128
Figura 103. Priorización de candidatos	129
Figura 104. Encargo de la prospección	129
Figura 105. Tipo de estaciones base	131
Figura 106. Consultor para simulación de cobertura	154
Figura 107. Fotografías de la ciudad de Rota	159

Figura 108. Zonas callejero de Rota	160
Figura 109. Zona 1. Ciudad de Rota.	160
Figura 110. Zona 2. Ciudad de Rota.	161
Figura 111. Zona 3. Ciudad de Rota.	161
Figura 112. Zona 4. Ciudad de Rota.	162
Figura 113. Zona 5. Ciudad de Rota.	163
Figura 114. Área de estudio. Ciudad de Rota.	164
Figura 115. Diagrama de radiación. Antena Seleccionada.	165
Figura 116. Ubicación emplazamientos Fase 0.	166
Figura 117. Pérdidas de propagación del área de simulación. Fase 0.	167
Figura 118. Leyenda. Pérdidas de señal en dB.	167
Figura 119. Cobertura. Nivel de RSRP esperado en Fase 0.	168
Figura 120. Leyenda de niveles de cobertura ó RSRP.	168
Figura 121. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. POLIDEPORTIVO. Fase 0.	169
Figura 122. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. LA CARBONERA. Fase 0.	169
Figura 123. Cobertura. Nivel RSRP POLIGONO PORTALEJO. Fase 0.	170
Figura 124. Cobertura. Nivel RSRP emplazamiento CHORRILLO. Fase 0.	170
Figura 125. Cobertura. Nivel RSRP emplaz. MARIA AUXILIADORA. Fase 0.	171
Figura 126. Cobertura. Nivel RSRP emplazamiento AVDA DIPUTACION. Fase 0.	171
Figura 127. Cobertura. Nivel RSRP en zona cartografía 3D. Fase 0.	172
Figura 128. Cobertura. Nivel RSRP en casco urbano. Fase 0	173
Figura 129. Pérdidas de propagación del área de simulación. Fase 1.	174
Figura 130. Cobertura. Nivel RSRP esperado área de simulación.	174
Figura 131. SNR esperado área de simulación	175
Figura 132. Leyenda EcN0	175
Figura 133. Cobertura. Nivel RSRP zona noroeste.	176
Figura 134. Cobertura. Nivel RSRP zona Oeste de la ciudad.	176
Figura 135. Cobertura. Nivel RSRP zona Norte (casco urbano)	177
Figura 136. Cobertura. Nivel RSRP zona centro y sur.	177
Figura 137. Cobertura. Nivel RSRP casco urbano.	178
Figura 138. Pérdidas de propagación fase 2	180
Figura 139. Cobertura ciudad fase 2	180
Figura 140. Cobertura ciudad zona noroeste. Fase 2.	181
Figura 141. Cobertura ciudad zona oeste ciudad. Fase 2.	181
Figura 142. Cobertura zona sur de la ciudad. Fase 2.	182
Figura 143. Cobertura zona centro de la ciudad. Fase 2.	182
Figura 144. Cobertura zona este de la ciudad. Fase 2.	183
Figura 145. Cobertura ciudad casco urbano. Fase 2.	183
Figura 146. Problemas detectados zona noroeste. Fase 2.	184
Figura 147. Problemas detectados zona oeste de la ciudad. Fase 2.	185
Figura 148. Problemas detectados zona sur de la ciudad. Fase 2.	186
Figura 149. EcN0 en la población. Fase 2.	187
Figura 150. Aplicación de un sistema repetidor LTE	188
Figura 151. Cálculo de capacidad por área y tráfico	190
Figura 152. Ejemplo de instalación con equipos NSN	191
Figura 153. Ejemplo de módulo de sistema y módulo RF de NSN	191
Figura 154. Efecto del ISD en la capacidad de una celda	193
Figura 155. Cell Throughput en función del rango de celda	193
Figura 156. Eficiencia espectral en función del ancho de banda	194
Figura 157. Asignación de recursos en UL.	196
Figura 158. Potencia de transmisión con offset en RS	196
Figura 159. Margen de Interferencia en función de la carga en DL	198
Figura 160. Ejemplo Margen de Interferencia en UL	198
Figura 161. Borde de cobertura.	201
Figura 162. Borde de célula interior	201

<i>Figura 163. Dirección del haz en área de otra célula</i>	202
<i>Figura 164. Frecuencias LTE disponibles</i>	204
<i>Figura 165. Torres de telefonía convencionales caso real (Centro Hípico)</i>	243
<i>Figura 166. Torres para antena trisectorial con un nivel de antena</i>	244
<i>Figura 167. Estructura para antena trisectorial con tres niveles de antenas</i>	245
<i>Figura 168. Torre con estructura cilíndrica y puertas para mantenimiento</i>	246
<i>Figura 169. Antena trisector en zona industrial</i>	247
<i>Figura 170. Antena trisector en mástil cilíndrico</i>	248
<i>Figura 171. Antenas integrada con iluminación en punta (entornos deportivos)</i>	249
<i>Figura 172. Antenas integradas en cilindro publicitario</i>	250
<i>Figura 173. Torre de iluminación</i>	251
<i>Figura 174. Comparativa mástil existente (derecha) y torre de iluminación con antena trisector (izquierda). Provincia de Cádiz. Fotos reales</i>	252
<i>Figura 175. Antena trisector con iluminación. Provincia de Cádiz. Fotos reales.</i>	252
<i>Figura 176. Torre de alta capacidad y estructura triposte de fibra de vidrio sobre tejado</i>	253
<i>Figura 177. Estructuras triposte multi-operador y plataformas elípticas</i>	254
<i>Figura 178. Estructura decorativa especial. Torre de 65 metros con estructura decorativa (a la izquierda) y torre con logotipo (a la derecha)</i>	255
<i>Figura 179. Mimetización tipo torre depósito de agua provincia de Cádiz. Foto real.</i>	256
<i>Figura 180. Estructura soporte antena trisector</i>	257
<i>Figura 181. Antena trisectorial autosoportada con placa abatible</i>	258
<i>Figura 182. Torres árbol 1 [31]</i>	259
<i>Figura 183. Torres árbol 2 [31]</i>	260
<i>Figura 184. Torre tipo árbol (palmera). Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	261
<i>Figura 185. Totem publicitarios</i>	262
<i>Figura 186. Radomos publicitarios</i>	263
<i>Figura 187. Comparativa chimenea real (izquierda) y mimetización sistema radiante (derecha). Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	264
<i>Figura 188. Mástil tipo chimenea en Hotel. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	264
<i>Figura 189. Antena trisectorial. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	265
<i>Figura 190. Sistema radiante en el interior de depósito de agua. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	266
<i>Figura 191. Sistema radiante tipo chimenea circular [31]</i>	267
<i>Figura 192. Construcción mástil trisectorial. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	268
<i>Figura 193. Torre tipo depósito de agua. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	268
<i>Figura 194. Detalle de estructura tipo depósito de agua. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	269
<i>Figura 195. Proceso de construcción de torre palmera. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	270
<i>Figura 196. Izquierda torre mimetizada tipo árbol. Derecha palmeras reales. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	271
<i>Figura 197. Antena omnidireccional</i>	271
<i>Figura 198. Solución 1: Tipo farola</i>	272
<i>Figura 199. Fotografía real de la Solución 1. Provincia de Cádiz.</i>	273
<i>Figura 200. Solución 2: Tipo iluminación. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	274
<i>Figura 201. Fotografía real de la solución 2. Provincia de Cádiz. Foto real.</i>	275
<i>Figura 202. Antena bilobular</i>	275
<i>Figura 203. Antena a mimetizar</i>	276
<i>Figura 204. Adaptación de cartel</i>	276
<i>Figura 205. Cartel adaptado</i>	277
<i>Figura 206. Interior de cartel luminoso real (sin adaptación)</i>	277
<i>Figura 207. Interior de cartel luminoso adaptado</i>	278
<i>Figura 208. Cartel luminoso adaptado</i>	278
<i>Figura 209. Hueco de cobertura de longitud 169 metros</i>	281
<i>Figura 210. Medidas LTE en interiores con Service Mode del terminal Samsung Gaaxy S4 Mini. A la izquierda niveles óptimos RSRP y RSRQ. A la derecha niveles deficientes.</i>	282
<i>Figura 211. Arquitectura de red Femto.</i>	285

<i>Figura 212. Modelo de Femto-Nodo</i>	285
<i>Figura 213. CS FallBack en LTE</i>	286
<i>Figura 214. Evolución LTE y llamadas de voz</i>	286
<i>Figura 215. Mejoras introducidas con LTE-Advanced</i>	287
<i>Figura 216. Carrier Aggregation</i>	287
<i>Figura 217. Mejora del MIMO</i>	288
<i>Figura 218. Coordinated Multipoint</i>	288
<i>Figura 219. Relaying</i>	288
<i>Figura 220. Redes heterogéneas</i>	289

ÍNDICE TABLAS

<i>Tabla 1. Cronograma de actividades</i>	11
<i>Tabla 2. Throughput por código</i>	22
<i>Tabla 3. Categorías de terminales</i>	23
<i>Tabla 4. Bandas de frecuencia soportadas</i>	35
<i>Tabla 5. Número máximo de RB soportados</i>	36
<i>Tabla 6. Asignación QCIs</i>	62
<i>Tabla 7. Canalización, resources blocks, nº de portadores por bandas</i>	121
<i>Tabla 8. Velocidades pico en función del ancho de banda</i>	122
<i>Tabla 9. Tipos de antenas</i>	133
<i>Tabla 10. Ejemplo de Parámetros del Trazado de Rayos.</i>	156
<i>Tabla 11. Fases de diseño.</i>	163
<i>Tabla 12. Emplazamientos Fase 0.</i>	166
<i>Tabla 13. Emplazamientos fase 1</i>	173
<i>Tabla 14. Emplazamientos fase 2</i>	179
<i>Tabla 15. Orientaciones de los emplazamientos fase 3.</i>	179
<i>Tabla 16. Emplazamientos y configuraciones</i>	188
<i>Tabla 17. Throughput DL / UL</i>	192
<i>Tabla 18. Máximo número de usuarios simultáneos</i>	192
<i>Tabla 19. Factor de escala debido a carga de celda</i>	195