



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

**COMPORTAMIENTO DE COBERTURA/CAPACIDAD EN
ENTORNOS INTERIORES FEMTOCELULARES**

Aitor Satóstegui Osés

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 29 de Junio de 2012



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
E.T.S.I.I. y de Telecomunicación
Campus de Arrosadía s/n
31006-Pamplona Navarra-Spain
Tfno: 34-48-169000 Fax: 34-48-169169



Acta de Proyecto Final de Carrera

Título:

*“COMPORTAMIENTO DE COBERTURA/CAPACIDAD EN
ENTORNOS INTERIORES FEMTOCELULARES”*

Alumno: Aitor Satóstegui Osés

Tutor del Proyecto: Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,

Presidente,

Secretario,

Vocal 1º,

Fdo:.....

Fdo:.....

Fdo:.....

acuerda otorgar la calificación de

Pamplona,de.....de 20.....

Resumen

Este proyecto se centra en la nueva forma de convergencia fijo-móvil en las telecomunicaciones, la tecnología femtocelular. Se pretende con este proyecto evaluar el comportamiento de este tipo de dispositivo en distintos entornos interiores.

Se va a ofrecer tanto nociones básicas de la tecnología y sus aplicaciones, como un completo estudio radioeléctrico tanto teórico como práctico de diferentes entornos. Se trata de estudiar el efecto de modificaciones, tanto topológicas como morfológicas en el funcionamiento de femtoceldas interiores.

Para ello se van a estudiar tres recintos morfológicamente diferenciados. En uno de ellos se podrá estudiar el efecto de pérdida de señal con la distancia. En otro de ellos se verá el efecto de los materiales utilizados en el recinto. Por último se estudiarán en conjunto las anteriores propuestas y se comprobará su funcionamiento bajo diferentes tipos de interferencia.

Con estos escenarios se pretende evaluar la cobertura que ofrecen este tipo de dispositivos en entornos cotidianos.

Abstract

This project focuses on the new form of fixed-mobile convergence in telecommunications: femtocelular technology. This project is intended to evaluate the behavior of this type of device in different indoor environments. There will be a basic understanding of both technology and its applications, such as a complete radio electrical study both theoretical and practical in different environments. It is to study the effect of modifications in the operation of femtocells in indoor environments, both as morphological and topological. For this, there will be a study of three morphologically distinct rooms. In one it may be possible to study the effect of signal loss due to distance. In another one we will see the effect of the materials used in the room. Finally, we will consider the above proposals together and will test its operation under different types of interference.

These studies are to evaluate the coverage offered by these devices in quotidian environments.

*A todos los que habéis creído en mi,
profesores y compañeros,
a Nuria y a mi familia,
especialmente para a mis padres,
por dármelo todo
Gracias*

Índice

Capítulo I

1.1. Contexto del proyecto	12
1.2. Estructura de la memoria	15
1.3. Objetivos	16
1.4. Planificación del proyecto	17
1.4.1. Explicación de las tareas por orden cronológico	18
1.5. Herramientas	21
1.5.1. Hardware	21
1.5.2. Software	22
1.5.2.1. Matlab	22
1.5.2.2. Sigmaplot	23

Capítulo II

2.1. Radiopropagación de ondas electromagnéticas	25
2.1.1. Ondas electromagnéticas	25
2.1.1.1. Polarización de una onda electromagnética	27
2.1.2. Radiopropagación	28
2.1.2.1. Reflexión y refracción.....	29
2.1.2.2. Difracción.....	32
2.1.2.3. Propagación por onda directa.....	32
2.1.2.4. Propagación por onda de superficie.....	32
2.1.2.5. Propagación Troposférica	33
2.1.2.6. Propagación Ionosférica	34
2.1.2.7. Propagación por el espacio	35
2.1.3. Radiocomunicación	35
2.1.3.1. Distorsión	36
2.1.3.2. Ruido e interferencia	37
2.1.3.3. Modos de explotación	38
2.1.3.3.1. Simplex	39
2.1.3.3.2. Semi-Duplex o Duplex	39
2.1.3.3.3. Full Duplex	39
2.1.3.3. Frecuencias Radioeléctricas	40
2.2. Modelos de Radio propagación	41
2.2.1. Introducción a los modelos	41
2.2.2. Validez de un modelo	43
2.2.3. Modelos de propagación en exteriores	43
2.2.3.1. Modelo Hata-COST 231	43
2.2.3.1. Desvanecimiento por sombra	45
2.2.4. Modelos de propagación en interiores	45
2.2.4.1. Modelo de propagación deterministas.....	46
2.2.4.2. Modelos basados en técnicas de trazado de rayos (Ray Tracing).....	47
2.2.4.2.1. Método de las Imágenes.....	48
2.2.4.2.2. Método de las Imágenes.....	49

2.2.4.3. Modelos FDTD.....	51
2.2.5. Modelos de propagación empírica	51
2.2.5.1. Propagación en espacio libre	52
2.2.5.2. Linear Path Attenuation Model	54
2.2.5.3. Modelo ITU-R P 1238	54
2.2.5.4. Modelo COST 231-Multiwall	55
2.2.5.5. Modelo Multiwall Simplificado	56
2.2.5.6 Modelo Keenan-Motley.....	57

Capítulo III

3.1. Evolución de los sistemas de comunicación móvil	59
3.1.1. Primera Generación (1G)	60
3.1.2. Segunda Generación (2G)	60
3.1.3. Tercera Generación (3G)	60
3.1.4. Transición actual	63
3.1.5. Cuarta Generación (4G)	65
3.1.6. LTE (Long Term Evolution)	67
3.1.6.1. Arquitectura de un sistema LTE	67
3.1.6.2. Tecnologías de nivel Físico	70
3.1.6.2.1. Bases de acceso multiple en LTE	70
3.1.6.2.2. Fundamentos de OFDMA	73
3.1.6.2.3. Parámetros de OFDMA empleados por LTE	76
3.1.6.2.4. Fundamentos de SC-FDMA	77
3.1.6.2.5. Parámetros de SC-FDMA empleados por LTE	79
3.2. Software Defined Radio: Principios y evolución hacia Cognitive Radio	80
3.2.1. SDR	80
3.2.1.1. Estructura de SDR	80
3.2.2. Cognitive Radio	82
3.3. Sistemas Femtocelulares	84
3.3.1. Introducción.....	84
3.3.2. Entonces, ¿qué es una femtocelda?	85
3.3.2.1. Aumento de cobertura y capacidad	86
3.3.2.2. Incremento global en la capacidad de la red	86
3.3.2.3. Reducción de costes	86
3.3.2.4. Instalación libre	87
3.3.2.5. Aumento del volumen de negocio	87
3.3.2.6. Tecnología Verde	87
3.3.2.7. Nuevo Mercado en expansión	88
3.3.3. Interferencias en espacios femtocelulares	88
3.3.4. Aspectos técnicos de las Femtoceldas	94
3.3.5. Infraestructura de la red	95
3.3.5.1. Arquitectura y terminología	96
3.3.6. Estandarización por el 3GPP	98
3.3.7. El Futuro de las Femtoceldas	99

Capítulo IV

4.1. Acercamiento al problema	103
4.1.1. Resultados escenario 1: Jerónimo de Ayanz	103
4.1.2. Preparación APS	110
4.1.3. Resultados escenario 1: Fuente encima de una estantería	114
4.1.4. Resultados escenario 1: Comparación con medidas reales	118
4.2. Resultados escenario 2: Despachos divididos	122
4.3. Simulaciones proyecto MLMR	128
4.3.1. Escenario 1: Femtocelda en la planta baja	131
4.3.2. Escenario 2: Femtocelda en la planta superior	133
4.3.3. Escenario 3: Femtocelda en el garaje	135
4.3.4. Comparativas	138
4.3.5. Interferencias	143
4.3.5.1. Interferencia Co-Canal	143
4.3.5.2. Interferencia Canal Adyacente	145
4.3.5.3. Relación Señal a Ruido	147

147

Capítulo V

5.1. Conclusiones	151
5.2. Líneas futuras	153
5.3. Glosario	154
5.4. Referencias	156

Anexo 1..... 159

Anexo 2167

Anexo 3.....173

Índice de Figura

Figura 1.1	Contexto general de acceso a redes, convergencia fijo-móvil
Figura 1.2	Ordenador Lenovo ThinkStation D20
Figura 1.3	Sony Vaio® VPCZ21X9E
Figura 1.4	Matlab 2009b
Figura 1.5	SigmaPlot 11
Figura 2.1	Onda Electromagnética
Figura 2.2	Características de una onda electromagnética
Figura 2.3	Polarización de una onda electromagnética
Figura 2.4	Ley de Fresnell
Figura 2.5	Reflexión dependiendo de la polarización de la onda electromagnética
Figura 2.6	Difracción
Figura 2.7	Propagación por onda directa
Figura 2.8	Propagación por onda de superficie
Figura 2.9	Propagación Troposférica
Figura 2.10	Propagación Ionosférica
Figura 2.11	Propagación espacial
Figura 2.12	Procesos de radiocomunicación
Figura 2.13	Comunicación Simplex
Figura 2.14	Comunicación Duplex
Figura 2.15	Comunicación Full-Duplex
Figura 2.16	Ley de Snell
Figura 2.17	Método de las imágenes
Figura 2.18	Ray Launching
Figura 2.19	Balance de potencia entre 2 antenas
Figura 3.1	Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles
Figura 3.2	Pronostico de cantidad de usuarios por tecnología móvil
Figura 3.3	Adopción de las tecnologías móviles después de su lanzamiento
Figura 3.4	Evolución de las tecnologías más relevantes de la telefonía móvil (2G a 4G)
Figura 3.5	EPS – Arquitectura del sistema LTE
Figura 3.6	Red de acceso E-UTRAN e Interfaces
Figura 3.7	Transmisor de portadora única
Figura 3.8	Transmisor basado en el concepto de FDMA
Figura 3.9	Transmisor basado en el concepto de multi-portadora
Figura 3.10	Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM
Figura 3.11	Estructura de Transmisor y Receptor OFDMA
Figura 3.12	Multiplexación de usuarios con OFDMA
Figura 3.13	Estructura de Transmisor y Receptor SC-FDMA
Figura 3.14	Multiplexación de usuarios con SC-FDMA
Figura 3.15	Diagrama de bloques de SDR
Figura 3.16	Varios Modelos de Femtoceldas actuales
Figura 3.17	Escenarios de interferencias para el DL
Figura 3.18	Escenarios de interferencias para el UL
Figura 3.19	Esquema de una red femtocelular
Figura 3.20	Despliegue de una femtocelda a través de ADSL
Figura 3.21	Arquitectura de acceso a red de un HNB
Figura 3.22	Capa de protocolos Iuh
Figura 3.23	Especificaciones del 3GPP sobre UTRA

Figura 3.24	Uso global de servicios de datos inalámbricos (Exabytes por mes)
Figura 3.25	Crecimiento de número de Smartphone en Europa
Figura 4.1	Laboratorio JdA en la primera prueba
Figura 4.2	Radiales y puntos de estudio para la APS
Figura 4.3	Simulación de JdA con la antena en la estantería
Figura 4.4	Potencia recibida con esta configuración
Figura 4.5	Posición de las medidas en el escenario
Figura 4.6	Escenario con pared central de cemento
Figura 4.7	Potencia recibida a 900 MHz con pared de cemento
Figura 4.8	Escenario con pared central de metal
Figura 4.9	Potencia recibida a 900 MHz con pared de metal
Figura 4.10	Escenario con pared central de cemento-metal
Figura 4.11	Potencia recibida a 900 MHz con pared de cemento-metal
Figura 4.12	Dibujo oficial del proyecto MLMR
Figura 4.13	Radiales del edificio MLMR
Figura 4.14	Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso A”
Figura 4.15	Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso B”
Figura 4.16	Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso C”
Figura A1.1	Evolución de los sistemas MIMO
Figura A3.1	Escenario con la pared central de cemento y metal con 3 columnas, tipo A
Figura A3.2	Potencia recibida con pared de cemento y metal con 3 columnas, tipo A
Figura A3.3	Escenario con la pared central de cemento y metal con 3 columnas, tipo B
Figura A3.4	Potencia recibida con pared de cemento y metal con 3 columnas, tipo B
Figura A3.5	Escenario con la pared central de cemento y metal con varias columnas, tipo A
Figura A3.6	Potencia recibida con pared de cemento y metal con varias columnas, tipo A
Figura A3.7	Escenario con la pared central de cemento y metal con varias columnas, tipo B
Figura A3.8	Potencia recibida con pared de cemento y metal con varias columnas, tipo B

Índice de gráficas

Gráfica 4.1	Radiales comparativas a la altura de la antena (A)
Gráfica 4.2	Radiales comparativas a la altura de la antena (B)
Gráfica 4.3	Potencia recibida en el corte Y=3'5m a un metro de altura
Gráfica 4.4	Potencia recibida en el corte X=4m a un metro de altura
Gráfica 4.5	Potencia recibida en el corte X=1m a tres metros de altura
Gráfica 4.6	Potencia recibida en el corte Y=11'5m a tres metros de altura
Gráfica 4.7	Retardo potencia a 2500 MHz
Gráfica 4.8	Corte de la sala a diferentes frecuencias
Gráfica 4.9	Comparativa de la hilera central
Gráfica 4.10	Comparativa de la hilera derecha
Gráfica 4.11	Comparativa de la hilera izquierda
Gráfica 4.12	Comparativa de la hilera central con los modelos empíricos
Gráfica 4.13	Potencia recibida con una pared de cemento
Gráfica 4.14	Potencia recibida con una pared de metal
Gráfica 4.15	Potencia recibida con una pared de cemento-metal
Gráfica 4.16	Comparativa de los diferentes materiales
Gráfica 4.17	Comparación de resoluciones
Gráfica 4.18	Radial 15

Gráfica 4.19	Radial 35
Gráfica 4.20	Radial 75
Gráfica 4.21	Gráfico comparativo de una pared
Gráfica 4.22	Gráfico comparativo de un piso
Gráfica 4.23	Gráfico comparativo de dos paredes

Índice de tablas

Tabla 2.1	Frecuencias Espectro Radioeléctrico
Tabla 2.2	Comparativa de modelos
Tabla 2.3	Parámetros del modelo ITU-R P.1238
Tabla 2.4	Factores de Pérdidas
Tabla 3.1	Valores de parámetros usados el <i>downlink</i> para cada ancho de banda de canal
Tabla 4.1	Resultados primera prueba con el Ray Launching
Tabla 4.2	Potencia recibida a 900 MHz
Tabla 4.3	Potencia recibida a 2500 MHz
Tabla 4.4	Potencia recibida a 900 MHz con la fuente en la estantería
Tabla 4.5	Potencia recibida a 2500 MHz con la fuente en la estantería
Tabla 4.6	Vistas de las plantas del edificio y escala
Tabla 4.7	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja
Tabla 4.8	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior
Tabla 4.9	Potencia recibida en las plantas con el emisor en el garaje
Tabla 4.10	Modelos Vr Ray Launching en Caso “A”
Tabla 4.11	Modelos Vr Ray Launching en Caso “B”
Tabla 4.12	Modelos Vr Ray Launching en Caso “C”
Tabla 4.13	Interferencia Co-Canal
Tabla 4.14	Interferencia Canal Adyacente
Tabla 4.15	Potencia de emisión de la femtocelda exenta de ruido
Tabla 4.16	SNR a diferentes potencias de ruido
Tabla A3.1	Potencia recibida JdA con antena central para todas las frecuencias simuladas
Tabla A3.2	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja a 2100 MHz
Tabla A3.3	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja a 2500 MHz
Tabla A3.4	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior a 2100 MHz
Tabla A3.5	Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior a 2500 MHz
Tabla A3.6	Potencia recibida en las plantas con el emisor en el garaje a 2100 MHz
Tabla A3.7	Potencia recibida en las plantas con el emisor en el garaje a 2500 MHz

CAPÍTULO I

1.1. Contexto del proyecto

Durante muchos años, la comunicación mediante cables ha sido la forma más habitual de intercambiar información entre dos puntos. No obstante, y a pesar de sus evidentes ventajas, este tipo de comunicaciones presenta las siguientes limitaciones:

- **Geográficas:** Dependiendo de la geografía del terreno donde queramos realizar las comunicaciones, la instalación y el mantenimiento de la infraestructura necesaria pueden resultar complicados. Esto sucede especialmente en áreas rurales, donde la orografía y la extensión del terreno son variables a tener en cuenta.
- **Económicas:** El coste de una red es proporcional a la longitud de cable requerido, así como al número de repetidores necesarios para contrarrestar los efectos de la atenuación. Esto significa que un aumento en la envergadura de nuestra red implica un aumento considerable en su coste.
- **Comodidad:** Teniendo en cuenta las necesidades de portabilidad de los usuarios de hoy en día, el uso de cables para el intercambio de información entre aparatos electrónicos se hace extremadamente inadecuado.

Estas tres principales limitaciones de las comunicaciones por cable explican el auge que están viviendo las tecnologías inalámbricas en los últimos años.

Las femtoceldas son un claro ejemplo de convergencia fijo-móvil en las redes de acceso. Una femtocelda es una estación base en miniatura, que se integra con la red móvil mediante una conexión de banda ancha, generalmente ADSL. Cuando el usuario está dentro de la cobertura de la femtocelda puede acceder a la red móvil. La ventaja es clara en aquellas zonas donde la cobertura de las celdas ordinarias es mala o insuficiente, por ejemplo en zonas rurales e interiores. Si se compara con otras fórmulas de convergencia fijo móvil, como la que utilizan terminales duales (3G + WiFi), las femtoceldas se caracterizan por emplear un único terminal normal 3G.

En el fenómeno que se conoce como convergencia fijo-móvil, se pretende que un mismo teléfono ofrezca ambos servicios fijo y móvil, alternando entre los dos tipos de red a conveniencia del usuario, en función de cómo este haya configurado sus preferencias. Para ello hay varias fórmulas. Hasta la fecha, la más común y barata es mediante teléfonos duales, que cuando el usuario se desplaza acceden a la telefonía móvil, y cuando el usuario está en un lugar fijo acceden a redes WiFi, en lo que se conoce como GAN (*Generic Access Network*). Una vez que se ha configurado el terminal, la conmutación o *handover* entre ambos tipos de red es automática sin que el usuario se percate de ello. Esto permite que cuando se está en casa o en la oficina, se utilicen servicios como *VoIP*, con el consiguiente ahorro económico.

La diferencia inmediata entre ambas tecnologías GAN vs. Femtoceldas es que esta última funciona con cualquier terminal 3G, mientras que la primera exige que el terminal sea dual.

La necesidad de los operadores móviles de seguir incrementando cobertura en interiores y generar ingresos en dichos espacios con servicios de voz y datos han despertado su interés a tal grado que rápidamente están promoviendo el concepto de femtoceldas, que en síntesis son pequeñas estaciones base de telefonía GSM o 3G de coste muy bajo. Estas, por tanto, funcionan en bandas de uso privativo asignadas a operadores de telefonía móvil y se instalan donde desee el usuario. Tienen una cobertura pequeña, de corto alcance, pero suficiente para entornos locales y se comunican con el sistema telefónico del operador mediante una conexión fija de banda ancha, por ejemplo xDSL. Con esta fórmula no hace falta que el teléfono sea dual, ya que un solo terminal 3G se puede usar tanto en interior como en exteriores, sin necesidad que el usuario se complique configurando qué medio de acceso ha de emplear cuando está en casa o en la oficina. El operador tiene una mejor garantía de calidad de servicio, y, sobre todo, mantiene un control pleno de los servicios y condiciones bajo las que accede el usuario.

La visión ideal es que las personas tengan un sólo terminal con un único número, una única agenda y un buzón de mensajería, para que aprovechen la conectividad de alta velocidad y relativamente asequible de su oficina y casa, y que también puedan utilizar los mismos servicios cuando se desplacen por carretera. Los servicios pasarán de ser prestados de una a otra red (en el caso de terminal dual GAN) o por un sistema femtocelular (si el terminal es 3G) sin que el usuario se percate de ello.

Con independencia de las motivaciones estratégicas o económicas, la mejor manera de aumentar la capacidad de un acceso radio es teniendo el transmisor cerca del receptor, lo que proporciona enlaces de mayor calidad, menor potencia transmitida y una mejor reutilización del espacio radio. Además, las redes con usuarios nómadas han de tener más cobertura, lo que tradicionalmente se conseguía mediante microceldas, antenas distribuidas o repetidores. Ahora hay una alternativa económica que se basa en el concepto de femtoceldas que consisten en puntos de acceso radio de ámbito local,

para extender la cobertura de los sistemas celulares 2G y 3G dentro de una oficina, comercio o empresa.

Aunque las primeras femtoceldas hicieron su aparición en 2009, su despliegue masivo aún no ha tomado el cariz que se esperaba. De hecho, este mismo año, varias empresas han presentado ya sus femtoceldas LTE, lo que hace unos años era prácticamente impensable y recibían el nombre de super-femtoceldas.

Que la situación y dinámica de los mercados de telecomunicaciones está cambiando es algo más que evidente desde hace algunos años. De este modo, en la siguiente figura se muestra qué lugar ocupan las femtoceldas en el contexto general de los medios de acceso a las redes:

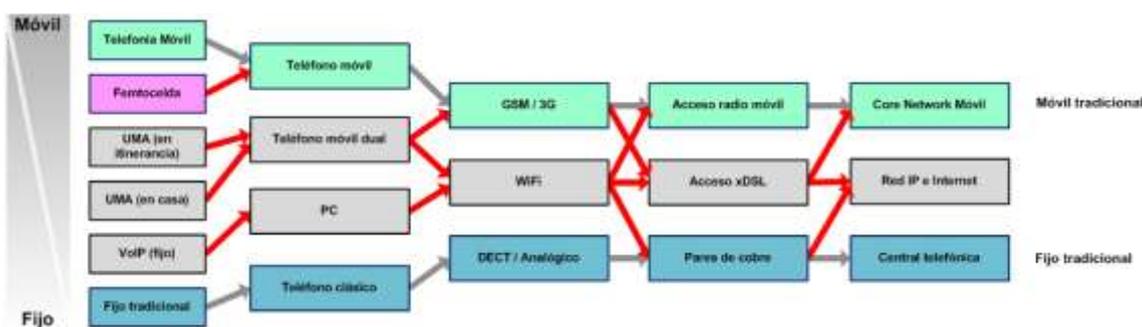


Figura 1.1: contexto general de acceso a redes, convergencia fijo-móvil

La cadena de la parte superior, en verde, corresponde a las actividades propias de un operador móvil. Y en la parte inferior están los intereses típicos de un operador fijo tradicional. En la zona intermedia, que está centrada en el acceso a Internet con baja movilidad, también se pueden prestar todo tipo de servicios. Y hasta la fecha ha sido trabajada por operadores fijos, incluidos algunos ISP y operadores de cable.

Las femtoceldas se pueden entender como el vehículo propio del operador móvil para prestar servicios en lugares fijos, donde el entorno geográfico de movilidad es bajo, mediante tecnologías móviles de acceso 3G.

Visto todo esto, parece claro cuáles pueden ser las ventajas de los sistemas femtocelulares. La primera y principal de todas es que aumentan la cobertura y capacidad de las redes y la eficacia del uso del espectro radioeléctrico. La segunda ventaja y no por ello menos importante es su baja potencia; de hecho, el posible efecto del terminal móvil sobre la salud, es menor que cuando se está en una macrocelda corriente. Pero las femtoceldas esconden muchas más ventajas y, como no podía ser de otra forma, ciertos inconvenientes. En esto se va a basar el proyecto, en estudiar las ventajas e inconvenientes de este tipo de sistemas y aplicarlo a escenarios reales.

1.2. Estructura de la memoria

Esta memoria está constituida por cuatro grandes bloques principales. En el primero de todo se van a dar a conocer tanto los objetivos del proyecto como su planificación inicial y los materiales necesarios para su realización. En el segundo bloque se va a dar a conocer la base de todo el estudio del proyecto, la radiopropagación de ondas electromagnéticas con todos sus fenómenos. Del mismo modo y también en este apartado, se mostrarán los modelos de radiopropagación existentes, como saber si son válidos, su clasificación y por último los modelos típicos para la caracterización de espacios interiores.

En el tercer gran bloque teórico y el más importante de todos se va a hacer una revisión de la evolución de los sistemas de comunicación móvil, desde su aparición hasta su estado actual. Otro punto importante de este bloque va a profundizar en las redes de cuarta generación o LTE, ya que están o estarán íntimamente ligadas al concepto de tecnología Femtocelular. En este apartado también se van a dar a conocer los conceptos de SDRF y *Cognitive radio*, muy usados por las femtoceldas. Por último se desarrollará el tema de las femtoceldas, su historia, el concepto, su arquitectura, sus ventajas e inconvenientes y su futuro.

El último y cuarto bloque es el de estudio, simulación y resultados. En él se van a recoger todos los datos obtenidos del estudio global del proyecto, tanto el estudio de la radiopropagación como los modelos utilizados, la simulación de escenarios femtocelulares diversos y la capacidad de estos. También se expondrán las interferencias típicas de una femtocelda y su comparación con los modelos empíricos.

1.3. Objetivos

Se ha creído oportuno detallar de forma concisa los objetivos que se pretenden conseguir con el trabajo de este proyecto para que, de este modo, queden claros desde el principio.

El principal objetivo que se pretende alcanzar es analizar la dependencia topológica de cualquier sistema de radiopropagación, en concreto de una red femtocelular para entornos interiores. Del mismo modo se va a intentar corroborar cuál es el mejor sistema de cálculo de cobertura para un entorno interior y para ello se compararan los modelos empíricos con el método determinista y una serie de mediciones reales.

Para llegar a comprender el estado actual de las telecomunicaciones, en concreto de las comunicaciones inalámbricas de nueva generación, se va a hacer una retrospectiva hasta el inicio de la telefonía móvil y se darán a conocer de forma sencilla los antecedentes de la tecnología femtocelular.

Las tecnologías inalámbricas actuales engloban varios tipos de tecnologías como por ejemplo *GSM*, *UMTS*, *HSDPA*, todos ellos conocidos como redes de tercera generación o algunos incluso de 3.5 G, pero a día de hoy existen ya las denominadas redes de cuarta generación que engloban la tecnología *LTE (Long Term Evolution)* y *LTE Advanced*. De esta forma se estudiarán también estas nuevas tecnologías y las nuevas características en modulación que llevan consigo y que serán utilizadas por los dispositivos femtocelulares.

Por último y como grueso principal de este proyecto se va a intentar profundizar en qué consiste y como operan los sistemas femtocelulares. Se estudiarán las características, ventajas y desventajas de este medio de transmisión inalámbrico. En cuanto a las desventajas, nos centraremos en el estudio de los dos tipos principales de interferencia, la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente.

1.4. Planificación del proyecto

Inicio del proyecto: 3 de Agosto de 2011

1. Planificación del proyecto
2. Estudio y conocimiento del proyecto
 - Requisitos
 - Análisis y estudio
 - Recopilación de información
 - Búsqueda de información relacionada con el proyecto
 - Búsqueda de proyectos similares
3. Introducción teórica:
 - RABANOS
 - Femtoceldas y LTE
4. Acercamiento *Ray Launching*:
 - Programación de distintos modelos
 - Utilización del código de *Ray Launching*
 - Creación de objetos y escenarios
5. Primeras pruebas:
6. Estudio e informes para el APS :
7. Simulaciones:
 - Despachos amueblados y sin amueblar
 - Pruebas con enrejado
 - Pruebas con diferentes materiales
 - Pruebas con columnas metálicas
 - Ver fenómenos de difracción, reflexión y refracción
 - Pruebas con diferentes resoluciones
8. Proyecto MLMR
 - Dibujo del edificio de 3 plantas
 - Simulaciones a 20 cm
9. Proyecto MLMR: segunda fase:
 - Nuevas resoluciones: 10cm
 - Interferencias co-canal (planta superior y planta baja)
 - Simulación de 20 antenas para interferencia de canal Adyacente.
 - SNR
 - Comparación de los resultados con los modelos empíricos
10. Memoria y Exposición

1.4.1. Explicación de las tareas por orden cronológico

1.- Planificación del proyecto: La planificación del proyecto consiste en organizar y planificar el desarrollo del proyecto: la estimación de los recursos a utilizar, el alcance del proyecto, duración de cada tarea, los objetivos de este...

2.- Estudio y conocimiento del proyecto: En este apartado se identificarán los distintos requisitos del proyecto y, de esta manera, se buscarán diferentes fuentes de información para comenzar.

Entre los materiales necesarios tenemos que valorar diferentes proyectos ya realizados, con el fin de no repetir algo que ya se haya estudiado. También habrá que realizar una búsqueda preliminar sobre fabricantes de hardware, software, distribuidores, legislación,...

3.- Introducción teórica: Al ser un proyecto que excede en algún campo los conocimientos adquiridos durante la carrera, es necesario hacer un estudio completo de alguna materia como electromagnetismo y radio propagación. Para ello es de gran utilidad la obra de José María Hernando Rábanos, *Transmisión por radio* [1].

Una vez adquiridos estos conocimientos, hay que centrarse en otros más concretos para el proyecto como son:

- *Femtocells: Technologies and Deployment* de Jie Zhang y Guillaume De la Roche.
- *Lte for Umts - Ofdma and Sc-fdma Based Radio Access* de Harri Holma y Antti Toskala

4.- Acercamiento al Ray Launching: Una vez adquiridos los conocimientos necesarios para comenzar con el proyecto, habrá que aprender a utilizar la herramienta de lanzamiento de rayos, lo que será básico durante todo el desarrollo del proyecto.

Antes de ello será imprescindible programar varios modelos de propagación de ondas con el fin de utilizarlos conjuntamente con los resultados de las simulaciones. Una vez hecho esto, habrá que utilizar el código de lanzamiento de rayos. Se comenzará con la creación de escenarios y objetos utilizando las funciones que incluye el código.

5.- Primeras Pruebas: Para ver el alcance de la herramienta que es utilizada, así como sus limitaciones, se desarrollarán una serie de pruebas con escenarios básicos creados para dicho fin. Estos comienzos se desarrollarán en el laboratorio del edificio “Jerónimo de Ayanz”

6.- APS: Para poder mandar un artículo al congreso International “*Symposium on Antennas and Propagation*”, será conveniente realizar un estudio exhaustivo de otros artículos relacionados con la radio propagación, los espacios femtocelulares y las tecnologías 4G (LTE).

Una vez vistas las necesidades del propio artículo, habrá que realizar las simulaciones necesarias para demostrar las componentes multitrayecto para el artículo de este congreso.

7.- Simulaciones: Al llegar a este punto habrá que plantearse qué escenarios simular, con la intención de hacer mediciones y contrastar el funcionamiento del código y comparar los resultados obtenidos con los modelos empíricos.

El primer paso será simular dos despachos con pared de separación (similares a los del departamento) con y sin muebles y comparar los resultados. Para ir más allá en el estudio de la radio propagación, se tendrán que cambiar los materiales de esta pared de separación, para lo que se realizarán diferentes pruebas:

- **Enrejado:** La primera prueba consistirá en ver cómo afecta un enrejado en una pared, por ejemplo, una pared de hormigón armado.
- **Diferentes materiales y anchuras:** Se probará el efecto de variar el grosor de dicha pared, así como los materiales de esta.
- **Pruebas con columnas metálicas:** Para ver los diferentes fenómenos de propagación (reflexión, refracción y difracción) se crearán diferentes paredes que contengan diferentes columnas metálicas.
- **Por último se probará variando la resolución de la simulación y se observara, como influye ésta en los resultados obtenidos.**

8.- Proyecto MLMR: El estudio de arquitectura MLMR Arquitectos Asociados ha facilitado los planos de un edificio “tecnológicamente eficiente” de futura construcción. Con él se realizarán diferentes simulaciones con el fin de poder entregarles un mapa de cobertura del edificio para diferentes frecuencias y así determinar la posición óptima del sistema femtocelular.

- **Diseño del edificio en MATLAB®:** Se diseña el edificio planta por planta, teniendo en cuenta materiales y grosores de paredes. Cada planta se comunica con la superior o inferior mediante el techo o suelo para crear un único edificio a la hora de simular.
- **Simulaciones a 20 cm:** Se elige esta resolución como punto de partida. Se simulan varias configuraciones de la posición del dispositivo emisor, así como varias potencias, frecuencias y tipos de directividad de las antenas. Así se encontrará la posición adecuada. Se encuentra que la simulación no es válida porque la resolución no es la adecuada.
- **Simulaciones a 10 cm:** Con la posición adecuada de la antena se tiene que volver a simular el edificio, esta vez con una resolución más adecuada.

9.- Proyecto MLMR, segunda fase: Una vez analizados los resultados con la resolución adecuada, se procede a verificar su validez para la introducción de este tipo de sistemas en un edificio de estas características:

- **Interferencia Co-canal:** Se utilizarán dos emisores de las mismas características emitiendo en la misma banda frecuencial. Para ello se dispone de una femtocelda en el piso superior y otra en el inferior. Analizando los resultados se obtendrá el diagrama de Relación Señal-Ruido (SNR) del edificio.
- **Interferencia de canal Adyacente:** Para ello se realizará una simulación con múltiples antenas, simulando un frente de onda proveniente de una macrocelda cercana al edificio. Este frente de ondas penetra en la vivienda por las ventanas principalmente y con una potencia equivalente a -60 dBm.
- **SNR:** Para verificar la calidad de la señal en este edificio se procederá a simular frentes de ruido genérico a diferentes potencias y se comparará su Relación Señal a Ruido.
- **Comparación de los resultados con los modelos empíricos:** Para comprobar que el código determinista de simulación basado en *Ray Launching* es el mejor método de cálculo de cobertura de un sistema de transmisión inalámbrico, se compararán los resultados obtenidos con diferentes modelos empíricos como pueden ser : Motley COST 231, Multiwall simplificado o ITU-R .P 1238

10.- Memoria y Exposición: Para finalizar el estudio de este proyecto se redactará una memoria en la que se recogerán tanto los conocimientos adquiridos como los resultados obtenidos de todas las pruebas, simulaciones y mediciones, así como datos complementarios utilizados para la correcta explicación de estos.

1.5. Herramientas

Para la realización de este proyecto se ha utilizado un ordenador portátil *Sony Vaio VPCZ21X9E* con un sistema operativo Windows 7 Ultimate de 64 bits.

El Software utilizado para simular ha sido Matlab R2009b 64 Bits de MathWorks.; para el análisis y obtención de los datos y graficas se ha utilizado

SigmaPlot 11; y para la realización de la memoria se ha utilizado el editor de textos Microsoft Office® 2007.

1.5.1. Hardware

El Hardware principal utilizado para las simulaciones ha sido una estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20 con las siguientes características.

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Figura 1.2: Ordenador Lenovo ThinkStation D20

El otro Hardware utilizado para simulaciones secundarias ha sido un portátil Sony Vaio® VPCZ21X9E con las siguientes características:

- Procesador Intel® Core™ i5-2620M (2'5 Ghz Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 4 MB)
- Memoria DDR2 SDRAM de 4096 MB a 1333 MHz
- Tarjeta grafica Intel® HD Graphics 3000 de 1 GB
- Disco duro de 640 GB



Figura 1.3: Sony Vaio® VPCZ21X9E

1.5.2. Software

Todo el Software se ha utilizado sobre un sistema operativo Windows 7 Ultimate de 64 Bits.

1.5.2.1 Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa Math-Works.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación M ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas. Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.

- Funciones matemáticas para el álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización y integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos en gráficas en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.

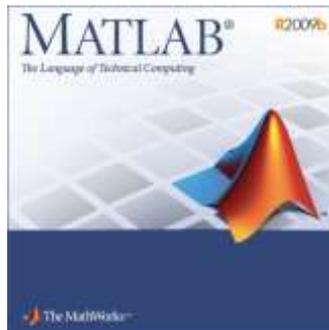


Figura 1.4: Matlab 2009b

1.5.2.2. SigmaPlot

SigmaPlot es un programa de graficación, el cual tiene guías de análisis estadístico con más de 50 métodos estadísticos y 100 tipos de gráficos. Es un programa creado por la empresa SYSTAT® y ha sido galardonado varias veces.

La elección de usar SigmaPlot para representar la mayor parte de los datos obtenidos de las simulaciones ha sido promovida por el hecho de que éste permite la representación de un modo muy sencillo, gracias a su simplicidad, y la gran capacidad de personalización de estos.

- Dispone de más de 80 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Personalización de cada detalle de los gráficos.
- Dibuja rápidamente los datos desde plantillas gráficas.
- Puede compartir gráficos de alta calidad en la Web.
- Combina las capacidades estadísticas de SPSS con SigmaPlot.
- Integración total con Microsoft Office.
- Puede dibujar cualquier fórmula matemática.



Figura 1.5: SigmaPlot 11

CAPÍTULO II

2.1. Radiopropagación de ondas electromagnéticas

Dado que el objetivo de este proyecto es caracterizar el canal electromagnético, es muy importante comprender toda la teoría que hay detrás de estos fenómenos. Para ello se comenzará explicando que es una onda electromagnética, para después poder hablar de la radio propagación electromagnética y los fenómenos asociados a esta. Por último, se expondrán los métodos actuales que existen para la explotación del canal y las diferentes frecuencias de radio propagación.

2.1.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas, son aquellas ondas que no necesitan ningún medio material para su propagación, a diferencia de otro tipo de ondas como las acústicas y dentro de ellas se incluyen la luz visible, ondas de radio, microondas, y rayos x entre otras.[1]

Se propagan gracias a la oscilación de un campo magnético y uno eléctrico, transportando energía por el espacio. Las ondas electromagnéticas son transversales y las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación y entre ellas como se muestra en la siguiente imagen.

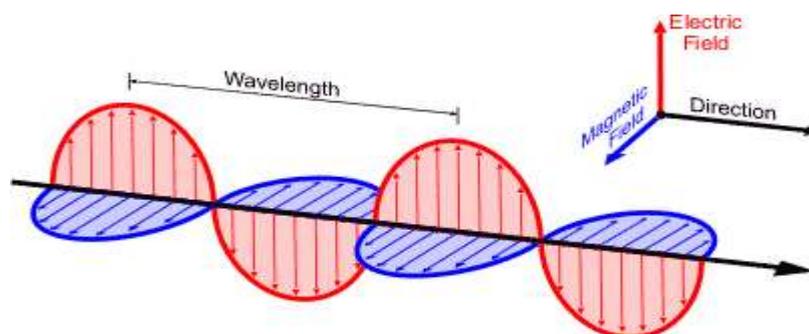


Figura 2.1: Onda electromagnética

En una onda electromagnética, se describen las siguientes características básicas, que nos ayudan a definir cómo es y cuyo conocimiento es necesario para entenderlas y poder trabajar con ellas:

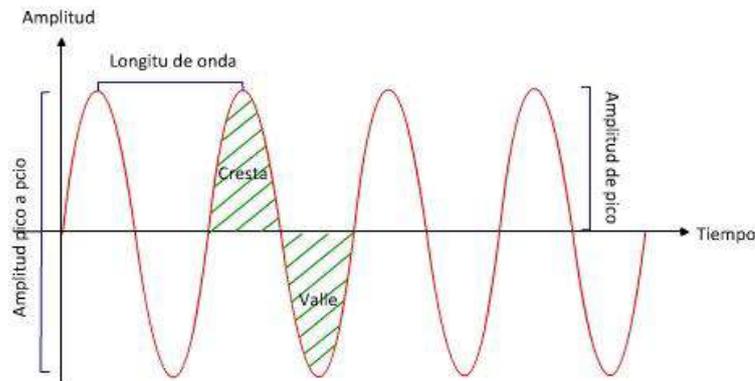


Figura 2.2: Características de una onda electromagnética

El valor de pico, es la magnitud de la máxima perturbación que genera la onda electromagnética en el medio. Dicho de otra manera es el valor máximo (valor de pico positivo) o mínimo (valor de pico negativo) que alcanza la señal. Si la señal no tiene componente continua, el valor de pico es la amplitud de esta. La separación entre el valor de pico positivo y el valor negativo toma el nombre de valor pico a pico y para señales sinusoidales es el doble de la amplitud. La amplitud de una señal se mide en Voltios (V), para el caso del valor pico a pico en voltios pico-pico (V_{pp}).

El periodo de una señal es el tiempo que tarda una señal en completar un ciclo y la distancia entre el punto inicial y final de un ciclo se denomina longitud de onda. La unidad del periodo es el segundo(s). El ciclo de una señal se refiere a cada patrón repetitivo de la onda electromagnética.

La frecuencia es la inversa del periodo y se refiere al número de ciclos que completa la onda en un intervalo de tiempo. En el caso de que este intervalo sea de un segundo, la unidad que se utiliza es el Hertzio (Hz). Su cálculo es simple:

$$f = 1/T$$

Donde:

f : Frecuencia de la onda en Hertzios (Hz)

T :Periodo de la onda en segundos(s)

La velocidad a la que se desplaza la onda, depende de su naturaleza y del medio por el que se desplaza y se interrelaciona con la frecuencia y con la longitud de onda de la señal mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = c/f$$

Donde:

λ : Longitud de onda en metros (m)

c : Velocidad de la onda en metros por segundo (m/s)

f : Frecuencia de la onda en Hertzios (Hz)

Por último se define la fase de una onda que relaciona la posición de una característica de un ciclo, como puede ser un pico, con la situación de la misma característica en otra onda. Se mide típicamente como un ángulo. En la definición de fase viene implícita la comparación de dos ondas con la misma frecuencia.

2.1.1.1. Polarización de una onda electromagnética

La polarización de una onda electromagnética nos dice la dirección del campo eléctrico de esta y su variación con el tiempo. Esta puede ser vertical u horizontal, de tal manera que cuando la polarización es horizontal el campo eléctrico es horizontal y el magnético vertical y cuando es vertical, el campo eléctrico es vertical y el magnético horizontal.

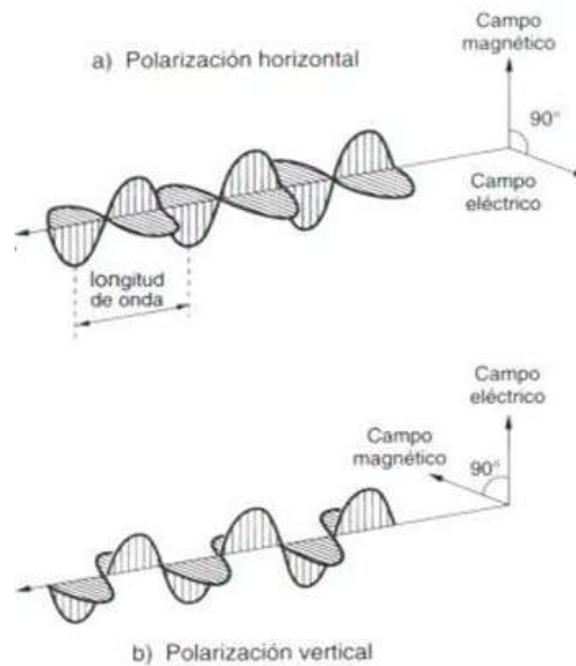


Figura 2.3. Polarización de una onda electromagnética

2.1.2. Radiopropagación

La propagación de las ondas se puede estudiar gracias a las ecuaciones de Maxwell, que se definen como:

$$\nabla * \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla * \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Donde:

\vec{E} : Campo eléctrico en Newton por Culombio (N/C)

\vec{B} : Campo magnético en Teslas (T)

\vec{D} : Desplazamiento eléctrico en culombios por metro cuadrado (C/m²)

\vec{H} : Intensidad magnética en Oersteds (Oe)

\vec{J} : Densidad de corriente en amperio por metro cuadrado (A/m²)

ρ : Densidad de carga en culombio por metro cúbico (C/m³)

De todas formas, en muchas ocasiones, este estudio riguroso es impracticable o extremadamente complejo, por lo que para la predicción de las pérdidas de propagación se hace uso de modelos basados en la óptica geométrica. Cuando estos modelos no son válidos, se emplean modelos empíricos o curvas de propagación normalizadas, conseguidas de mediciones. [1]

Las características de propagación de una onda dependen de diversos factores, situación del trayecto de propagación respecto a los objetos, características eléctricas del terreno, propiedades físicas del medio y de la frecuencia y polarización de la onda.

Para entender mejor como se propaga una onda radioeléctrica, a continuación se explican los tres fenómenos que se dan cuando una onda cambia de medio o se encuentra con un obstáculo:

2.1.2.1.-Reflexión y refracción:

Cuando una onda incide sobre una superficie de separación entre dos medios se pueden producir estos dos fenómenos simultáneamente o individualmente. Si la onda incidente regresa al medio inicial, se da el fenómeno de la reflexión. [1]

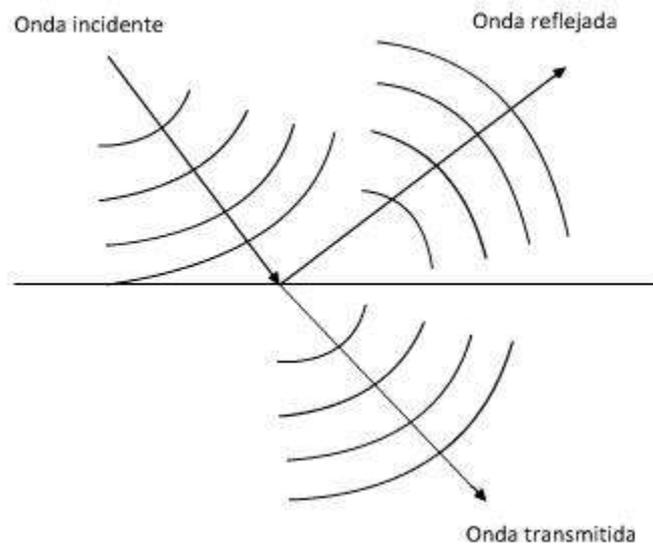


Figura 2.4: Ley de Fresnell

Dependiendo del tipo de superficie de separación la reflexión puede ser parcial o total y puede producirse un cambio de fase dependiendo de la rigidez de esta. La reflexión total se dará en el caso en el que la onda incida en un conductor perfecto, en el que no habrá ni difracciones ni pérdidas por absorción. Por otro lado, a no ser que la superficie de separación sea un dieléctrico perfecto, se producirán pérdidas de absorción cuando la onda incida.

En el caso de la difracción, la onda se transmite al segundo medio y esta experimenta cambios tanto de velocidad como de dirección. Este fenómeno solo se dará en el caso de que la onda incida oblicuamente en la superficie de separación y sus índices de refracción sean distintos.

El índice de refracción determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.

Las ecuaciones de Fresnell describen la reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas en estas circunstancias, pero para ello tenemos que tener en cuenta la polarización de la onda. Así, si la onda tiene polarización vertical, o dicho de otra manera, su polarización es paralela al plano de incidencia, se define la siguiente fórmula:

$$r_{\text{Paralelo}} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_t - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_t + \eta_1 \sin \theta_i}$$

Si por lo contrario la polarización es horizontal o perpendicular, la fórmula es la siguiente:

$$r_{\text{perpendicular}} = \frac{E_r}{E_t} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t}$$

Donde:

r_{Paralelo} : Coeficiente de reflexión de Fresnel para la polarización paralela

$r_{\text{Perpendicular}}$: Coeficiente de reflexión de Fresnell para la polarización perpendicular

E_r : Campo eléctrico reflejado

E_t : Campo eléctrico transmitido

2: Coeficiente de refracción del segundo medio

1: Coeficiente de refracción del primer medio

i : Ángulo de incidencia

t : Ángulo de transmisión

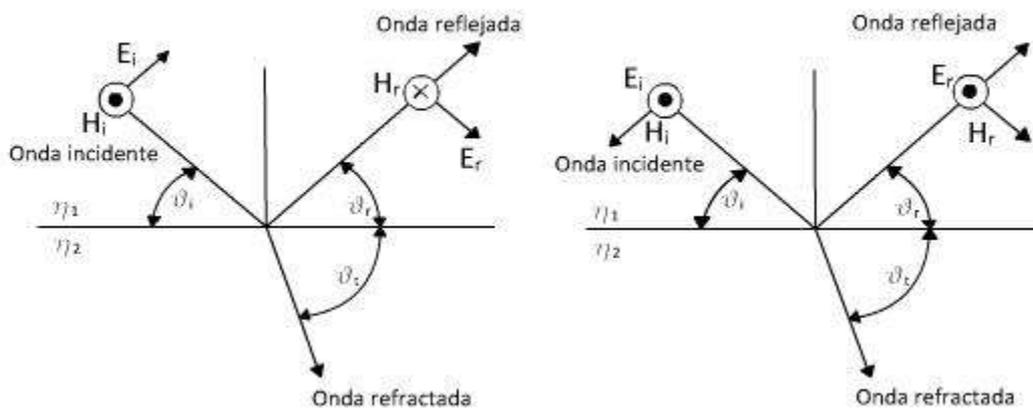


Figura 2.5: Reflexión dependiendo de la polarización de la onda electromagnética

2.1.2.2.-Difracción

Cuando un obstáculo se interpone en el camino de la propagación de las ondas se convierte en una fuente secundaria que emite ondas derivadas de la onda inicial. Este fenómeno se da gracias a que las ondas son capaces de rodear el obstáculo. [1]

Para que se dé la difracción la longitud de onda tiene que ser mayor que las dimensiones del objeto, por lo que la difracción se vuelve inapreciable cuando el objeto está dotado de unas dimensiones grandes en referencia a la onda.

Por lo tanto resulta obvio que cuanto menor sea la frecuencia, más apreciable será la difracción.



Figura 2.6: Difracción

A continuación se describirán los tipos más habituales de propagación

2.1.2.3. Propagación por onda directa

Cuando el transmisor y el receptor se sitúan en la superficie terrestre y entre ellos existe una visión directa, se modela la propagación mediante dos rayos, uno directo y otro reflejado. [1]

Cuando existe la visión directa hay que tener en cuenta también el siguiente tipo de propagación, la propagación por superficie, ya que dependiendo de la naturaleza del terreno la frecuencia y la polarización de la onda puede ser relevante.

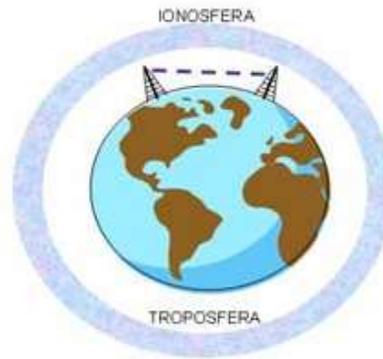


Figura 2.7: .Propagación por onda directa

2.1.2.4. Propagación por onda de superficie

Es el modo de propagación dominante para frecuencia bajas, entre 10 KHz y 10 MHz. Esta onda se va curvando y rodeando los obstáculos por efecto de la difracción ya que esta es muy intensa a frecuencias tan bajas. Por ello se ve poco afectada por la curvatura de la tierra. Para que esta onda presente alcances útiles, su polarización ha de ser vertical, ya que las componentes horizontales son absorbidas por el suelo. [1]



Figura 2.8: Propagación por onda de superficie

2.1.2.5. Propagación troposférica

Esta propagación puede actuar de dos formas diferentes, directamente de antena a antena, en caso de que estas tengan visión directa, o radiándose con cierto ángulo hacia los niveles superiores de la troposfera, donde esta se refleja hacia la tierra.

El primer método está condicionado a la situación del receptor y el transmisor, ya que estos necesitan estar dentro de distancias de visión, la cual está limitada por la curvatura de la tierra, por lo que el segundo método cubre mayores distancias. [2]



Figura 2.9: Propagación Troposférica

2.1.2.6. Propagación ionosférica

En este tipo de propagación, las ondas de radio de alta frecuencia se radian hacia la ionosfera donde se reflejan. La densidad entre troposfera e ionosfera, hace que la onda de radio se acelere y cambie de dirección, curvándose de nuevo hacia la tierra. La ventaja de esta transmisión es que permite cubrir grandes distancias con menor potencia de salida. [2]



Figura 2.10: Propagación ionosférica

2.1.2.7. Propagación por el espacio

Para llevar a cabo esta propagación la onda es irradiada hacia el espacio, donde un satélite retransmitirá la señal sin necesidad de que se dé lugar la difracción atmosférica. Es básicamente una transmisión de visión directa haciendo uso de un intermediario. Con este sistema, se incrementa considerablemente la distancia que puede cubrir una señal.

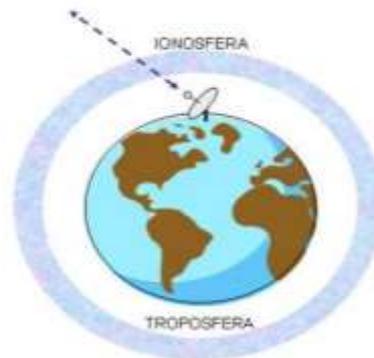


Figura 2.11: Propagación espacial

2.1.3. Radiocomunicación

En este apartado se define la radiocomunicación y todos los conceptos básicos que tienen que ver con ésta. [1]

La radiocomunicación se define como la comunicación que se realiza por medio de ondas radioeléctricas. Las ondas radioeléctricas son aquellas ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial y cuyo límite superior de frecuencia se fija en 3000 GHz.

La técnica de la radiocomunicación consiste en superponer la información a transmitir en una onda electromagnética denominada portadora. La inserción de esta información toma el nombre de modulación.

Como consecuencia se genera una onda modulada, en cuyo espectro se encuentra un conjunto de frecuencias en torno a la portadora, que es enviada al medio de propagación a través de un dispositivo de acoplamiento denominado antena.

La antena genera un flujo saliente de energía en forma de ondas electromagnéticas que toma el nombre de radiación. El conjunto de equipos necesarios

para el tratamiento de la información entre los que se encuentran antenas, moduladores, filtros y demás, forma la estación transmisora. La radiación producida por la estación se conoce como emisión o dicho de otra manera, el proceso de radiar una onda modulada.

La radiocomunicación se produce entre la estación emisora ya descrita y una estación receptora, que es el conjunto de equipos necesarios para el tratamiento de la señal recibida (antenas, amplificadores, demoduladores y filtros). La onda modulada generada en la estación transmisora y emitida al medio de propagación alcanza el punto o puntos de destino donde accede al sistema receptor por medio de una antena de recepción, la cual recoge una fracción de la energía radioeléctrica transmitida.

En todo este proceso, tanto los órganos de recepción como los de transmisión contribuyen positivamente a la radiocomunicación, a diferencia del medio de transmisión, que introduce pérdidas y diversos tipos de perturbaciones, las cuales se explican a continuación:

2.1.3.1. Distorsión

Se define distorsión como la diferencia entre la señal que entra en un sistema y la señal que sale de este, por lo tanto se podría decir que es la deformación que producen las diferentes partes del sistema en la forma de la señal original. [1]

Se dan dos tipos de distorsiones, las lineales y las no lineales. Dentro de las distorsiones lineales se encuentran las distorsiones de amplitud y fase.

La distorsión de amplitud se da cuando la señal a la salida del equipo no guarda la misma relación de amplitud que guarda la señal de entrada entre diferentes frecuencias. La de fase en cambio, se produce cuando a la salida no se conserva la relación de fase entre diferentes frecuencias.

Las distorsiones no lineales se producen cuando en la señal de salida aparecen frecuencias no deseadas que no había en la señal de entrada.

2.1.3.2. Ruido e interferencias

Las perturbaciones debidas al ruido se dan cuando aparece una señal no deseada de origen natural o artificial; y las interferencias en cambio, son señales emitidas por otros destinos presentes en el receptor que el emisor no había emitido. [1]

La potencia extraída de la onda radioeléctrica debe competir tanto con la potencia del ruido como con la potencia de interferencia, por lo que se establece un valor umbral que depende de la clase de radiocomunicación y frecuencia de la portadora, por debajo del cual no se puede recuperar la información.

El alcance útil o cobertura de una emisión radioeléctrica depende del tipo e intensidad de las perturbaciones. Cuando solo interviene el ruido, el umbral es la potencia mínima para obtener cierta calidad de recepción. En el caso de que la perturbación genere una interferencia, el alcance de cobertura viene establecido por la relación de potencia entre la señal deseada y la señal interferente para una calidad de recepción específica.

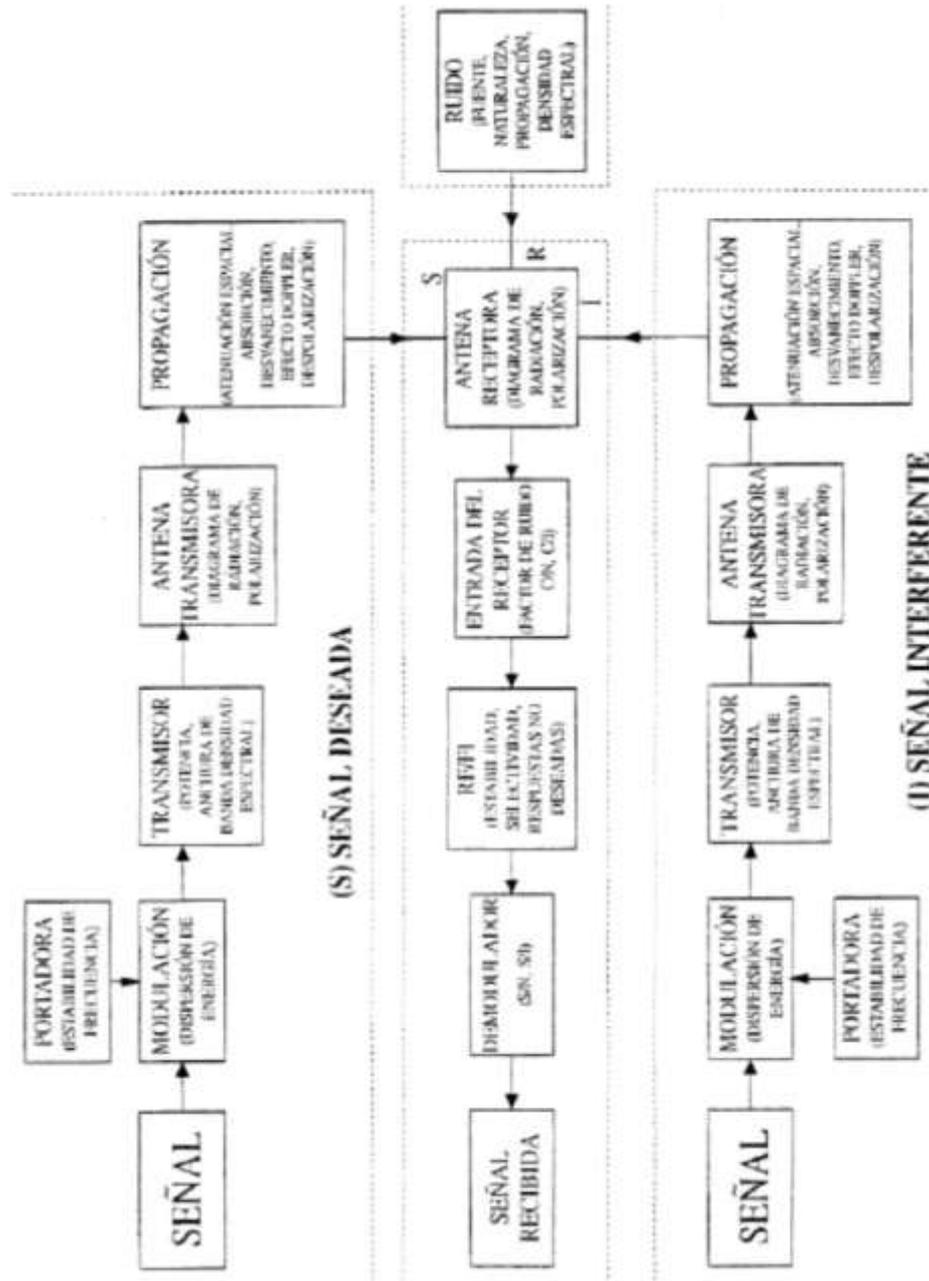


Figura 2.12: Proceso de radiocomunicación

2.1.3.3. Modos de explotación

Los modos de explotación se refieren a la forma en el que se comunican dos puntos de enlace y en radiocomunicación se distinguen tres modos de explotación: simplex, semi-duplex o duplex, y full-duplex; explicados a continuación.

2.1.3.3.1. Simplex

Es el modo de explotación que solo permite transmitir alternativamente en uno u otro sentido de un canal de radiocomunicación pero nunca en los dos sentidos.



Figura 2.13: Comunicación simplex

2.1.3.3.2. Semi-Duplex o Duplex

Es un modo de explotación simplex en un punto del enlace y en el otro modo duplex, en este caso también es necesario el uso de dos frecuencias diferentes para la comunicación.

Así mismo, este modo de explotación que permite la transmisión en los dos sentidos de un canal de radiocomunicación. Para que esto sea posible es necesario el uso de dos frecuencias para la transmisión en los dos sentidos.

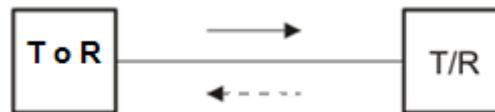


Figura 2.14. Comunicación duplex

2.1.3.3.3.-Full-Duplex

Es el modo de explotación que permite la transmisión en los dos sentidos de un canal de radiocomunicación. Para que esto sea posible es necesario el uso de dos frecuencias para la transmisión en los dos sentidos.



Figura 2.15. Comunicación Full Duplex

2.1.3.4.-Frecuencias radioeléctricas

El espectro radioeléctrico se divide en bandas de frecuencia y estas se atribuyen a los diferentes servicios radioeléctricos. El espectro radioeléctrico es un recurso natural muy escaso, por lo que su uso debe ser lo más óptimo posible y el hecho de necesitar una frecuencia radioeléctrica para cada enlace de radiocomunicación hace de esta labor algo muy complicado. [1]

Las atribuciones son efectuadas por la UIT y quedan recogidas en el Cuadro de Atribuciones de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones.

El espectro radioeléctrico se divide en nueve bandas de frecuencia designadas por números enteros en orden creciente, como se puede comprobar en la siguiente tabla.

SIGLA	DENOMINACION	LONGITUD DE ONDA	GAMA DE FRECUENC.	CARACTERISTICAS	USO TIPICO
VLF	VERY LOW FRECUENCIAS Frecuencias Muy Bajas	30.000 m a 10.000 m	10 KHz a 30 KHz	Propagación por onda de tierra, atenuación débil, Características estables.	ENLACES DE RADIO A GRAN DISTANCIA
LF	LOW FRECUENCIAS Frecuencias Bajas	10.000 m. a 1.000 m.	30 KHz a 300 KHz	Similar a la anterior, pero de características menos estables.	Enlaces de radio a gran distancia, ayuda a la navegación aérea y marítima.
MF	MEDIUM FRECUENCIAS Frecuencias Medias	1.000 m. a 100 m.	300 KHz a 3 MHz	Similar a la precedente pero con una absorción elevada durante el día. Prevalece propagación ionosférica durante la noche.	RADIODIFUSIÓN
HF	HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Altas	100 m. a 10 m.	3 MHz a 30 MHz	Prevalece propagación Ionosférica con fuertes variaciones estacionales y en las diferentes horas del día y de la noche.	COMUNICACIONES DE TODO TIPO A MEDIA Y LARGA DISTANCIA
VHF	VERY HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Muy Altas	10 m. a 1 m.	30 MHz a 300 MHz	Prevalece propagación directa, ocasionalmente propagación Ionosférica o Troposférica.	Enlaces de radio a corta distancia, TELEVISIÓN, FRECUENCIA MODULADA
UHF	ULTRA HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Ultra Altas	1 m. a 10 cm.	300 MHz a 3 GHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Enlaces de radio, Ayuda a la navegación aérea, Radar, TELEVISIÓN
SHF	SUPER HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Superaltas	10 cm. a 1 cm.	3 GHz a 30 GHz	COMO LA PRECEDENTE	Radar, enlaces de radio
EHF	EXTRA HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Extra-Altas	1 cm. a 1 mm.	30 GHz a 300 GHz	COMO LA PRECEDENTE	COMO LA PRECEDENTE
EHF	EXTRA HIGH FRECUENCIAS Frecuencias Extra-Altas	1 mm. a 0,1 mm.	300 GHz a 3.000 GHz	COMO LA PRECEDENTE	COMO LA PRECEDENTE

Tabla 2.1: División del espectro radioeléctrico

2.2 Modelos de Radiopropagación

En las páginas siguientes, se pretende explicar algunos de los modelos de propagación de ondas en señales radioeléctricas. Aunque se haga mención de los modelos de propagación en exteriores, conviene centrarse en los modelos para entornos interiores, que son en los que se ha basado este proyecto.

2.2.1 Introducción a los modelos

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, [3] por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis. De este modo, se puede definir un modelo científico como el resultado o explicación de determinados fenómenos naturales representados de una forma abstracta.

Normalmente, los modelos se representan con ecuaciones, gráficos, dibujos, estructuras bidimensionales o tridimensionales, o explicaciones en texto libre para que el concepto que transmite el modelo pueda ser comunicado.

A la hora de plantear y/o hacer un modelo es necesario plantear una serie de hipótesis, de manera que lo que se quiere representar este suficientemente cerca de la realidad, aunque también se busca que sea lo bastante sencillo como para poder ser manipulado y estudiado.

Los modelos científicos se pueden clasificar de muchas formas, atendiendo a su construcción podemos encontrar diferentes tipos de modelos. A continuación se describen brevemente estos tipos:

- Modelos matemáticos: Son procedimientos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno modelado. Dependiendo de la complejidad de las fórmulas matemáticas y del número de parámetros de las que estas dependan, será más o menos factible su utilización, atendiendo siempre al coste computacional que impliquen.
- Modelos deterministas: Estos modelos se basan en los principios fundamentales de la física que se refieren a la propagación de ondas de radio y a los fenómenos que la rodean. No tienen ninguna distribución de probabilidad, y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación (entradas). con la misma entrada van a producir la misma salida. Toda la base teórica que gobierna los fenómenos

electromagnéticos está desarrollada a partir de las ecuaciones de Maxwell.

- Modelos estocásticos: Son modelos en los que los resultados del modelo tienen una distribución de probabilidad. La misma entrada no tiene porqué producir los mismos resultados, en reiteradas simulaciones del modelo.
- Modelos empíricos o estadísticos: Se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno.

La principal ventaja de este tipo de modelos es que se tienen en cuenta de forma implícita las influencias propias del entorno en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada.

Por el contrario, su precisión depende no sólo de la precisión de las medidas, si no de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar.

- Modelos teóricos: Se basan en los principios fundamentales del medio que se intenta. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin que se vea afectada su precisión.

En la práctica la implementación de modelos teóricos requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales en la práctica son imposibles o muy difíciles de obtener.

Los algoritmos usados por los modelos teóricos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes.

- Modelos de caja negra: Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin que importe lo que pase en el interior.

2.2.2 Validez de un modelo

Para determinar si un modelo es aceptable, es decir si es válido, debe cumplir al menos estos tres factores:

- El modelo puede explicar las observaciones realizadas del fenómeno.
- Se puede usar el modelo para predecir el comportamiento del fenómeno modelado.
- El modelo es consistente con otras ideas acerca del funcionamiento del fenómeno modelado.

Basándose en el cumplimiento de las tres condiciones aquí expuestas se decide su aceptabilidad, aunque con bastante frecuencia se pueden dar varias situaciones en las que exista más de un modelo que sea una explicación válida del fenómeno. Además, los modelos no son inamovibles. Es frecuente que, con el aumento de observaciones del fenómeno, se cambien los modelos y aparezcan otros más aceptables para explicar más casos de comportamiento que antes no se habían contemplado [3].

2.2.3 Modelos de propagación en exteriores

Este proyecto no se centra en los modelos de propagación *outdoor*, sino en los *indoor*. Pero para entender estos hay que hacer una breve aproximación de los exteriores, al menos de uno de ellos, el Okumura Hata-COST231.

2.2.3.1. Modelo Hata-COST231

El modelo Hata-COST231 parte del original formulado por Okumura y ha sido extendido para cubrir frecuencias UMTS, se trata de un modelo empírico que trata de ajustar las pérdidas por propagación a las medidas reales tomadas en diversos escenarios urbanos.

La expresión de las pérdidas de propagación viene dada por:

$$L_b(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) \\ - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \cdot \log_{10}(d) + c_m$$

Donde:

- $d(km)$: distancia del enlace en Km
- $f(MHz)$: frecuencia en MHz
- $h_t(m)$: altura de la estación base en m

- $h_r(m)$: altura del móvil en m
- $a(h_r)$ es el factor de corrección por la altura del móvil si $h_r \neq 1.5 m$

$$a(h_r) = 0 \text{ si } h_r = 1.5m$$

- $c_m(dB)$: factor de corrección según el tipo de escenario:
-

$$c_m(dB) = \begin{cases} 0 & \text{Ciudad pequeña - mediana} \\ 3 & \text{Ciudad grande} \end{cases}$$

Ciudad pequeña-mediana

$$a(h_r) = (1.1 \log_{10} f - 0.7) h_r - (1.56 \log_{10} f - 0.8)$$

Ciudad grande

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10} 11.75 h_r)^2 - 4.97$$

Los resultados obtenidos mediante el modelo son válidos siempre y cuando los anteriores parámetros se encuentren dentro de los siguientes rangos:

- $1500 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$
- $30\text{m} \leq h_t \leq 200\text{m}$
- $1\text{m} \leq h_r \leq 10\text{m}$
- $d \geq 500\text{m}$

Cabe destacar que estas expresiones cubren un rango de frecuencias de hasta 2000 MHz, sin embargo, vamos a considerar que siguen siendo válidas para 2100 MHz, donde se encuentra la frecuencia del enlace descendente *UMTS*. También hay que decir que con distancias menores a 1 km se produce un pequeño error.

2.2.3.2. Desvanecimiento por sombra

En el modelo de propagación explicado en el apartado anterior no se tiene en cuenta aspectos aleatorios en la propagación como puede ser el desvanecimiento por

sombra de obstáculos que hacen que sea necesario introducir un término aleatorio en la atenuación de propagación [1][4]. Teórica y experimentalmente se deduce que este término tiene una distribución Gaussiana en dB (log-normal en unidades naturales) con media nula y desviación típica σ que dependerá del entorno y del modelo de cálculo utilizado para la pérdida de propagación.

$$L_{b \text{ real}} = L_{b \text{ modelo}} + X\sigma$$

Para aumentar el porcentaje de cobertura es necesario añadir este margen de seguridad que dependerá del porcentaje de cobertura perimetral que se desee. Usualmente se especifica un objetivo del 90%: margen de $X\sigma = 1.28\sigma$. Los valores habituales para propagación en interiores de σ están entre 3 y 4 dB.

En cuanto al efecto de *shadowing* en exteriores, se ha tenido en cuenta que el efecto por sombra dependerá de la altura de la antena de usuario. Así, se considera que a una altura de 0m el efecto de *shadowing* será máximo e irá bajando hasta tener un efecto nulo a una altura de usuario igual a la de la estación base. Por tanto, la expresión para el desvanecimiento por sombra queda de la siguiente manera:

$$X\sigma(h_r) = (X\sigma \text{ a } 0m) * \left(1 - \frac{h_r}{h_t}\right)^n$$

Donde $(X\sigma \text{ a } 0m) = 1.28\sigma$

En nuestro caso n vale 1 para considerar un comportamiento lineal. Para otros valores de n será necesario realizar medidas en entornos reales.

2.2.4. Modelos de propagación en interiores

El campo de la propagación interior es relativamente nuevo y las primeras investigaciones datan de primeros de los 1980s. La llegada de las *WLAN* y las *WPAN* hace todavía más necesario el disponer de modelos de interior de predicción de cobertura.

Los modelos de propagación en interiores son de gran interés principalmente para la predicción de cobertura y de esta manera facilitar tareas como:

- Predecir el tamaño de las áreas que se pueden cubrir con un único punto de acceso.

- Planificar la ubicación de las celdas de modo que, aun utilizando la misma frecuencia, no se produzcan interferencias.

En entornos cerrados, los niveles de señal oscilan en mayor medida que en entornos abiertos. Esta diferencia se explica en el hecho de que en una localización específica, el campo eléctrico se forma por un número mucho mayor de componentes indirectos que en el caso de un entorno abierto. A este fenómeno se le conoce como propagación multitrayecto.

De acuerdo con [3] a continuación se van a definir y explicar diferentes tipos de modelos y sus aplicaciones:

2.2.4.1 Modelos de propagación deterministas

Estos modelos se basan en los principios fundamentales de la física que se refieren a la propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Toda la base teórica que gobierna los fenómenos electromagnéticos está desarrollada a partir de las ecuaciones de Maxwell. Como anteriormente se ha explicado estas son sus ecuaciones, en una de sus posibles formas:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Usando estas cuatro ecuaciones se pueden resolver todos los problemas electromagnéticos de una manera total, obteniendo así una solución concreta para cada punto del espacio. No es necesario entrar en detalles del desarrollo de estas expresiones pero hay que destacar que pese a que parezcan expresiones sencilla para el campo eléctrico E y el campo magnético H las expresiones que se derivan de ellas son ecuaciones muy complejas.

Lo que hacen las técnicas deterministas es solucionar estas ecuaciones, generalmente alguna aproximación de ellas. El problema es que solucionar estas ecuaciones es un proceso muy costoso y complejo, ya que deben ser aplicadas en todos los puntos del espacio además de tener en cuenta todas las condiciones de contorno entre estos puntos. Esto hace que el cálculo computacional al utilizar este tipo de técnicas sea muy elevado.

Existen numerosas técnicas de modelado deterministas. Por ejemplo, algunas de ellas se basan en métodos integrales, diferenciales, bien en el dominio del tiempo o de la frecuencia, etc. Dos de las técnicas más utilizadas y estudiadas en entornos *indoor* son

las basadas en el cálculo FDTD (*Finite Difference Time Domain*) y las basadas en la Óptica Geométrica (*Geometrical Optics* o *GO*).

2.2.4.2. Modelos basados en técnicas de trazado de rayos (*Ray Tracing*)

Las técnicas basadas en trazado de rayos se fundamentan en la aplicación de la teoría de la óptica geométrica. Este método es uno de los más antiguos que se utilizan para alta frecuencia, ya que se desarrollo originalmente para analizar la propagación de la luz a frecuencias ópticas. A frecuencias elevadas no es necesario considerar la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos. Esta teoría proviene de considerar el transporte de energía a lo largo de un tubo de rayos, sin precisar si la energía se propaga en forma de ondas o de partículas.

Al no tener en cuenta la naturaleza ondulatoria de los campos, el método de óptica geométrica no es capaz de predecir la difracción por lo que las técnicas basadas en trazado de rayos también se apoyan, además de en *GO*, en teorías de difracción como en la Teoría Geométrica de la Difracción (*GTD*), en la Teoría Uniforme de la Difracción (*UTD*) o en la Teoría Física de la difracción (*PTD*).

La teoría de Óptica Geométrica se basa en los siguientes conceptos:

- Las líneas de flujo de energía o rayos son rectas en un medio homogéneo. En medios heterogéneos, siguen el camino de longitud óptica estacionaria, es decir, de longitud mínima (principio de Fermat).
- Los rayos son reflejados por la superficie conductora según la ley de Snell. En consecuencia, a un punto de observación determinado llegan únicamente los rayos provenientes de los puntos de reflexión especular y no del resto de la superficie.
- -La variación de la amplitud del campo a lo largo de un tubo de rayos está determinada por la ley de conservación de la energía. Por tanto, la amplitud del campo es inversamente proporcional a la sección recta transversal del tubo.



Figura 2.16: Ley de Snell

En los algoritmos basados en trazado de rayos la señal se propaga al igual que si fuesen rayos ópticos (aproximación del frente de onda), lo que hace que el análisis sea más sencillo. Los fenómenos que se contemplan en la propagación son principalmente tres: reflexión, refracción y difracción. También existen otros fenómenos como el *Scattering Difuso* que algunos algoritmos también contemplan.

Respecto a la forma de trazar los rayos existen dos métodos principales, el método de las imágenes y el método de lanzado de rayos.

Aunque en las simulaciones realizadas para confeccionar este proyecto el método de las imágenes no se ha contemplado, vamos a describir su funcionamiento para poder compararlo con el de Lanzado de rayos

2.2.4.2.1. Método de las imágenes:

Esta técnica consiste en calcular las imágenes del receptor con los objetos más importantes, generalmente los más cercanos, y posteriormente considerar las trayectorias desde el transmisor a cada una de las imágenes.

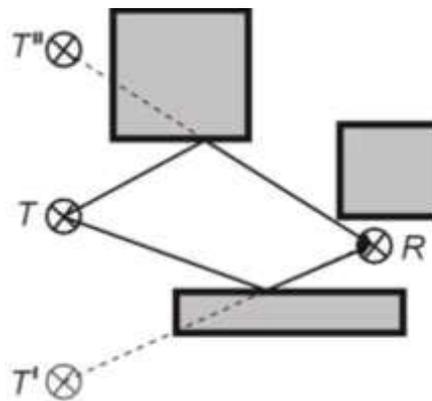


Figura 2.17. Método de las imágenes

Las trayectorias de los rayos ópticos que definen el frente de onda quedan perfectamente definidas y pueden ser trazadas con gran exactitud. La potencia total recibida puede obtenerse como la suma coherente de todas las contribuciones.

Cuando el escenario se complica la utilización de este método es desaconsejable, sobre todo cuando se consideran reflexiones en número superior a dos, ya que el tiempo de cálculo crece exponencialmente con el orden de las reflexiones.

2.2.4.2.2. Lanzado de rayos

Es técnica, también conocido como *Ray Launching*, consiste básicamente en lanzar un número finito de rayos del transmisor. La distribución de los rayos debe ser uniforme en las distintas direcciones del espacio, cubriendo así el ángulo sólido completo deseado. Para cada rayo se consideran las múltiples reflexiones y refracciones que pueda sufrir hasta alcanzar el receptor.

El numero de estas reflexiones y refracciones a considerar dependerá del nivel de señal a partir de la cual una contribución pueda ser considerada como poco significativa, tras un periodo de tiempo determinado o tras un número limitado de interacciones con los obstáculos.

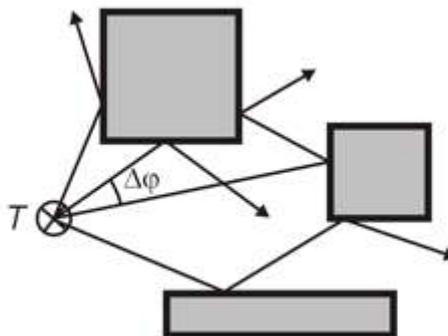


Figura 2.18. Ray Launching

Este método es muy útil en entornos complejos ya que es más fácil seguir los rebotes de los rayos, pero también es más complicado encontrar con los rayos los receptores ya que es necesario un número suficiente de rayos para cubrir todo el espacio y que algún rayo alcance a esos receptores.

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre los dos métodos de acuerdo a un estudio empírico realizado por el grupo europeo COST 231. En este caso en el Lanzado de Rayos se han tenido en cuenta cinco reflexiones y doce penetraciones y en el Método de las Imágenes reflexiones de hasta segundo orden además de los elementos difractantes principales.

	Método de las imágenes		Lanzado de rayos	
	STD (dB)	Error Medio(dB)	STD(dB)	Error Medio(dB)
Dos pisos: 856 MHz	9.0	-2.7	6.2	0.3
Dos pisos: 1800 MHz	11.3	10.3	8.7	0.1
Más de 2 pisos: 856 MHz	7.8	-2.6	9.1	-4.6
Más de 2 pisos: 1800 MHz	10.9	11.7	11.8	-5.7

Tabla 2.2: Comparativa de modelos

Observando los valores de la tabla anterior se comprueba que, en general, el Lanzado de Rayos es mejor técnica que el Método de las Imágenes, especialmente a mayores frecuencias.

Con los modelos que hacen uso de la Óptica Geométrica se obtienen soluciones relativamente simples en los estudios de radio propagación. Sin embargo con *GO* se obtienen buenos resultados cuando se trabaja con elementos eléctricamente grandes. Además las técnicas de difracción, como *UTD*, son rigurosas cuando se trata de estudios de conductores perfectos.

Al enfrentarse a estructuras con pérdidas y de dimensiones comparables a la longitud de onda, el trazado de rayos no es la solución óptima.

Esto cobra mayor importancia cuando tanto las antenas transmisoras como las receptoras se instalan próximas a estructuras de materiales complejos para los que no podemos aplicar soluciones asintóticas, aunque si la solución a las ecuaciones de Maxwell.

Por lo tanto, las características de la radio propagación se pueden derivar resolviendo directamente las ecuaciones de Maxwell relativas a la propagación de ondas electromagnéticas.

2.2.4.3. Modelos FDTD

El método *FDTD* (*Finite-Difference Time-Domain*) es uno de los métodos más utilizados para la obtención de una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell.

En este método las ecuaciones de Maxwell se aproximan por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Previamente a la realización de los cálculos

es necesario definir un mallado, es decir una cuadrícula específica sobre el área de interés. Una vez que estas condiciones iniciales han sido definidas, el algoritmo *FDTD* emplea las diferencias centrales para aproximar las derivadas tanto en el espacio como en el tiempo. En los nodos de la cuadrícula la solución se determina iterativamente, resolviéndose de este modo las ecuaciones de Maxwell directamente. Al igual que los modelos basados en trazado de rayos, los modelos *FDTD* exigen una carga computacional muy elevada. El tiempo de computación depende proporcionalmente del tamaño del área a ser analizada, pero no significativamente de los detalles incluidos en su descripción. Sin embargo el número de nodos de la cuadrícula está exponencialmente relacionado al tamaño del área y la frecuencia de operación. Las ventajas de este modelo son su gran exactitud y que facilita una solución completa para todos los puntos de una cierta geometría. La precisión del modelo *FDTD* está por encima a la de los modelos basados en trazado de rayos y la predicción es tan precisa como pueda serlo la base de datos de descripción del área. Esta técnica también es interesante ya que puede ofrecer, junto con una de trazado de rayos, una herramienta híbrida para desarrollar un modelo de propagación adecuado que combine exactitud y coste computacional. La idea básica sería usar esta última en el análisis de áreas amplias y *FDTD* para el estudio de áreas cercanas a estructuras de materiales complejos, donde el trazado de rayos no es suficientemente exacto.

2.2.5. Modelos de propagación empíricos

Los modelos empíricos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de conjuntos de medidas realizadas sobre el terreno. La principal ventaja de estos modelos es que las influencias propias del entorno son tenidas en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada. Por el contrario, su precisión depende no solo de la precisión de las medidas sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar.

Con estos modelos de propagación lo que se pretende generalmente es estimar las pérdidas de potencia de la señal en el camino (*path loss*). Para ello es necesario recordar las relaciones existentes en la propagación de señales en espacio libre. Los modelos que se detallan son los siguientes[3]:

- Propagación en espacio libre
- Linear Path Attenuation
- ITU-R
- Kennan-Motley

- COST 231 Multiwall
- Multiwall simplificado

2.2.5.1. Propagación en Espacio Libre

Los cálculos de propagación en espacio libre se utilizan para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe línea de visión directa. Para dos antenas separadas una distancia r , conectadas a sus correspondientes transmisor y receptor, la ecuación de transmisión de Friis establece la relación entre la potencia recibida y la radiada. La potencia que la antena receptora entregara a su carga adaptada tiene un valor:

$$P_L = \frac{P_r}{4\pi r^2} D_r A_{efR}$$



Figura 2.19. Balance de Potencia entre dos antenas

Se puede relacionar la directividad y el área efectiva de cualquier antena. Esto permite reescribir la ecuación anterior en términos de la directividad que tendría la antena receptora si actuara como transmisora:

$$\frac{A_{ef}}{D} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Resultando entonces:

$$\frac{P_L}{P_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 D_T D_R$$

El término $(\lambda/4\pi r)^2$ se denomina pérdida de transmisión en el espacio libre, L_0 , y se corresponde con la pérdida de transmisión entre antenas isotropas. Tomando, en decibelios, un valor.

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 22 + 20 \log \left(\frac{r}{\lambda} \right) = 32.5 + 20 \log f + 20 \log r$$

En general se tiene:

$$\frac{P_L}{P_T} = L_0 + D_r + D_R - L \quad (dB)$$

Donde:

Todos los términos se expresan en decibelios

L engloba los factores de pérdidas provocadas por la desadaptación en las antenas y las pérdidas.

Desde el punto de vista del computo del balance de potencia en sistemas de comunicaciones, es preferible referir la potencia recibida, P_R , a la potencia transmitida, P_T , entendida en este caso como la entregada a la antena. La ecuación de transmisión resultante se escribe en términos de las ganancias de las antenas y en el factor de pérdidas L' no se han de contabilizar las pérdidas en las antenas, por estar ya incluidas en las ganancias.

$$\frac{P_L}{P_T} = L_0 + G_r + G_R - L' \quad (dB)$$

A continuación se presentan cinco modelos empíricos de cálculos de propagación. Aunque existen varios modelos más, estos son los más importantes y en los que se ha basado el desarrollo de este proyecto.

2.2.5.2. Linear Path Attenuation Model

Para un transmisor y un receptor que se encuentran en la misma planta, Andelman propuso el “*Linear path attenuation model*”. El *path loss* medido en *dB* se obtiene de las pérdidas en espacio libre (L_{FS}) más un factor lineal que se obtiene experimentalmente. La fórmula utilizada en este modelo es:

$$L(r) = L_{FS} + a \cdot r \quad (dB)$$

Donde:

a : Coeficiente de atenuación lineal

r : Distancia entre transmisor y receptor.

En el caso de un ambiente de oficinas, el coeficiente “ a ” sería 0.47 dB/m . Este no tiene en consideración efectos de desvanecimiento. Solo toma en consideración la pérdida en espacio libre. Este modelo es susceptible de ser específico de un sitio, esto es debido a que el valor de “ a ” varía de un entorno a otro y debe ser medido con precisión para poder demostrar los beneficios de este modelo. En general “ a ” varía de 0.23 a 0.62 dB/m .

2.2.5.3. Modelo ITU-R P.1238

El modelo ITU-R realiza una predicción de las pérdidas de propagación entre dos terminales para planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores, agregando pérdidas debidas a muebles, paredes internas, puertas, etc. Estos elementos son representados por el índice N . Esta recomendación define tres escenarios diferentes, como son: residencial, oficina y comercial.

Es conveniente destacar que a diferencia de otros modelos más complejos, no requiere conocimiento alguno del número de paredes entre el emisor y el receptor. Las pérdidas por propagación vienen dadas por:

$$L = 20 \log(f) + N \log(r) + L_f n - 28 \quad (\text{dB})$$

Donde:

N : Coeficiente de pérdida de potencia frente a distancia

f : Frecuencia (MHz)

r : Distancia entre estación base y estación móvil ($d > 1\text{m}$)

L_f : Factor de pérdidas por penetración en el suelo

n : Número de plantas entre estación base y terminal ($n \geq 1$)

En el rango de frecuencia entre 1.8 y 2 GHz, definimos los siguientes escenarios:

	N	L _f
Zona Residencial	28	4·n
Zona de Oficinas	30	15 + 4(n-1)

Zona Comercial	22	6+3(n-1)
----------------	----	----------

Tabla 2.3. Parámetros del modelo ITU-R P.1238

2.2.5.4. Modelo COST 231 Multi-Wall

El modelo COST 231 es uno de los modelos más completos para cálculos de radio propagación en entornos interiores. Este modelo predice la potencia recibida calculando las pérdidas en el camino recorrido entre el transmisor y el receptor. El modelo además de contar con las pérdidas por espacio libre y diversos parámetros empíricos tiene en cuenta las paredes, techos y suelos que son atravesados. La fórmula utilizada para calcular las pérdidas es:

$$L = L_{FS} + L_C \sum K_{wi} L_{wi} + n \left(\frac{n+2}{n+1} - b \right) L_f \quad (dB)$$

Donde:

L_{FS} : Pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor

L_C : Constante de ajuste de pérdidas

K_{wi} : Número de paredes de tipo i penetradas

n : Número de suelos penetrados

L_{wi} : Pérdida debida a muro de tipo i

L_f : Pérdida entre suelos adyacentes

b : Parámetro empírico

En la siguiente tabla se muestran valores típicos para los factores de pérdidas.

	Descripción	Factor (dB)
L_f	Suelos (estructura típica)	18.3
	Baldosas o Revestimiento de hormigón Espesor < 30cm	

L_{w1}	Muros interno finos Yeso o pareces con huecos (ventanas y/o puertas)	3.4
L_{w2}	Muros internos gruesos Hormigón o Ladrillo	6.9

Tabla 2.4. Factores de Perdidas

Cabe destacar que este es el modelo de propagación *indoor* que se utiliza en UMTS. Este modelo está profundizado en la especificación de los procedimientos seleccionados para la elección de las tecnologías de transmisión de radio para UMTS.

2.2.5.5. Modelo Multiwall simplificado

Este modelo caracteriza las pérdidas de señal a lo largo de un trayecto en interior por un exponente fijo de valor 2 (como en el espacio libre) y unos factores de pérdida relacionados con el número de suelos y muros que atraviesa la línea recta entre emisor y receptor.

$$L = L_1 + 20 \log(r) + n_f a_f + n_w a_w \quad (dB)$$

Donde:

r : Distancia en metros en línea recta

L_1 : Pérdida de referencia con $d=1$ metro

a_f : Atenuación por cada suelo que atraviesa

a_w : Atenuación por cada muro que atraviesa

n_f : Número de suelos que atraviesa

n_w : Número de muros que atraviesa

Los valores de atenuación que se consideran son los que aparecen en la tabla.2.4

2.2.5.6. Modelo Keenan-Motley

J.M. Keenan y A.J. Motley propusieron un modelo que se basa tanto en la teoría como en las medidas hechas en la práctica. Este modelo mide las pérdidas por Propagación mediante el nivel de la señal recibida y una distancia de referencia. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$L(d) = L_M + 10 n \log(d) + L_{ap} + L_0 + k_f L_{FW} \quad (dB)$$

Donde:

L_M : Pérdidas medidas a 1 metro.

L_{ap} : Coeficiente introducido para compensar el diagrama de radiación de la antena

L_0 : Exceso de pérdidas que no dependen de los suelos o techos atravesados.
Engloba pérdidas por *scattering*, difracción, etc.

L_{FW} : Coeficiente de pérdidas por penetración a través de suelos/techos.

k_f : Número de suelos/techos penetrados.

Este modelo depende tanto de la teoría como de pérdidas medidas. El *path loss* medido es una buena forma de saber el comportamiento del modelo. Sin embargo este modelo no puede ser utilizado para predecir el nivel de señal recibido, dado el requerimiento de medidas del *path loss* reales.

CAPÍTULO III

3.1. Evolución de los sistemas de comunicación móvil

Las tecnologías de acceso inalámbricas han evolucionado de distintas maneras pero todas ellas tienen un objetivo común: obtener el mejor funcionamiento y la mayor eficiencia en entornos con alta movilidad del usuario. La evolución histórica de los sistemas de comunicaciones móviles se estructura en varias generaciones que agrupan sistemas de características técnicas similares. La figura 3.1 muestra esta clasificación.

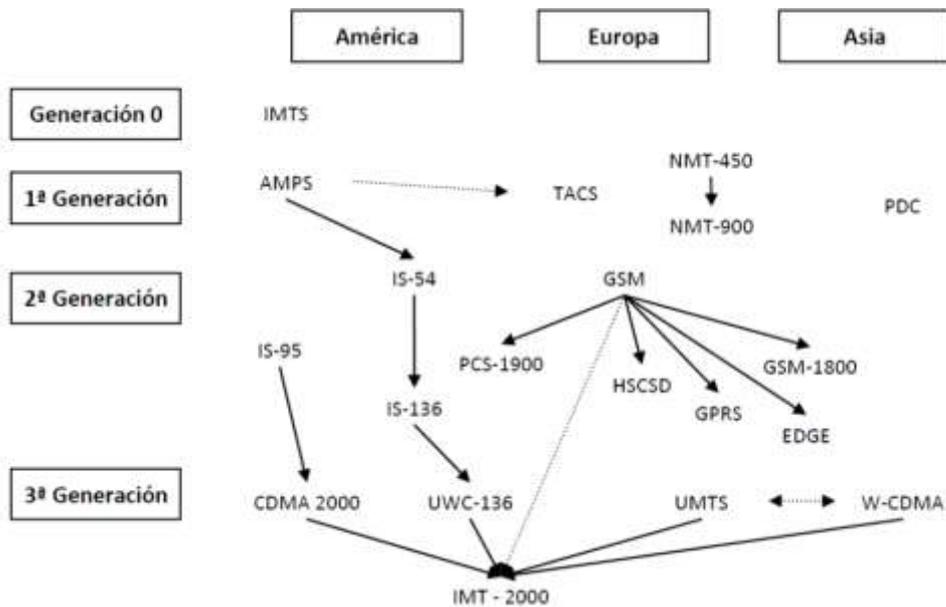


Figura 3.1: Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles

3.1.1. Primera Generación (1G)

Los sistemas de primera generación se caracterizaban por realizar la transmisión analógica de servicios de voz con baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios utilizando para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), lo que hacía a estos sistemas limitados en relación al número de usuarios a los que podía dar servicio, además de contar con una limitada capacidad de *roaming*.

El principal representante de esta generación es AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) desplegado en Estados Unidos a partir de 1983 que operaba en la banda de los 800 MHz. A partir de este estándar se desarrollaron otros en diferentes países de Europa como TACS (*Total Access Communication System*) en Reino Unido y España, ó NMT (*Nosdiska Mobil Telefongruppen*) en los países nórdicos.

3.1.2. Segunda Generación (2G)

Las limitaciones de los sistemas de Primera generación comenzaron a hacerse evidentes a finales de los años 80, por lo que se comenzó a trabajar en el desarrollo de nuevos estándares.

En 1989 la TIA (*Telecommunications Industries Association*) liberó el estándar IS-54 ó D-AMPS, con transmisión digital y multiplexación por división en el tiempo.

En 1993 comenzó a funcionar en Estados Unidos el sistema IS-95. Este sistema, también llamado CDMA-One, fue el primer sistema móvil celular en utilizar la tecnología CDMA con ensanchamiento del espectro por secuencia directa. Posteriormente, este estándar se extendería a todo el continente americano y a Asia.

En Europa, el principal representante de esta generación es GSM (*Global System for Mobile communications*), basado en FDMA y TDMA. Este estándar fue puesto en funcionamiento en 1992 y actualmente está extendido por prácticamente todo el mundo.

3.1.3. Tercera generación (3G)

Entre los años 1996 y 1998 las grandes compañías y organizaciones de telecomunicaciones alrededor del mundo pertenecientes a la ITU (*International Telecommunication Union*) empezaron a ofrecer propuestas que cumplieran las características del estándar que la misma había aprobado años atrás, denominada IMT-

2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*), con la finalidad de desarrollar un estándar global unificado para las redes inalámbricas de tercera generación (3G). Debido al caos generado por las múltiples propuestas, la ETSI planteó la creación del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), una organización global con el objetivo de desarrollar tecnologías de tercera generación basándose en GSM, lo que causó discusiones entre la ETSI y la ANSI (*American National Standards Institute*) con el argumento de que la consolidación de esfuerzos debía ayudar a todos los “miembros de la familia” ITU [5]. Como consecuencia se inició la creación de una organización en paralelo denominada 3GPP2, con los mismos objetivos pero basándose en la tecnología CDMA2000.

Los sistemas de tercera generación están enfocados principalmente a ofrecer mejoras en la comunicación multimedia, como transferencia de imágenes y videos, así como incrementar la velocidad de transmisión permitiendo la aparición de nuevos servicios y aplicaciones, al mismo tiempo que facilita el acceso a redes tanto públicas como privadas. El proceso de estandarización IMT-2000 exigía originalmente requisitos mínimos como:

- 2Mbps para interiores (poca movilidad).
- 384kbps para exteriores (movilidad media).
- 144kbps para vehículos (movilidad alta).

El 3GPP2 siguiendo estos requisitos se encargó de desarrollar el denominado CDMA2000 1xEV-DO (*Evolution - Data Only*), una de las principales tecnologías de esta generación, introducida comercialmente en Corea en enero del 2002 y considerada la primera fase evolutiva de los sistemas CDMA2000 de tercera generación, ya que también utiliza canales de 1.25MHz; como su nombre lo indica las mejoras están enfocadas en la transferencia de datos [6]. En la *Release 0* del estándar, la máxima velocidad de pico alcanzada era de 2.4Mbps en el *downlink* y 153kbps en el *uplink*.

Esta tecnología utiliza en vez de un sistema de control de potencia un sistema de control de tasa de datos, de forma tal, que un solo usuario es atendido a la vez logrando velocidades promedio entre 400 y 700kbps [5] a expensas de aquellos usuarios que presenten condiciones de canal pobres y que generalmente son aquellos que se encuentran alejados de la estación base. Entre los principales inconvenientes que tuvieron las operadoras con respecto al estándar, fue la necesidad que establecía de reservar portadoras con el objetivo de que fueran usadas únicamente para datos, lo que representaba un riesgo dada la incertidumbre de la época sobre los ingresos económicos que se podrían obtener debido a que la demanda de datos no era excesiva, además era necesario agregar a las estaciones base una *channel card* para que pudieran ser compatibles con los sistemas CDMA-One y CDMA2000 1x anteriores.

En consecuencia el 3GPP2 desarrolló otro estándar, otra evolución de la tecnología CDMA2000 denominada CDMA2000 1xEV-DV (*Evolution – Data and Voice*), orientada tanto para voz como para datos, permitiendo servicios de voz y de transmisión de paquetes a altas velocidades y de forma simultánea en el mismo canal de 1.25MHz usado en las versiones anteriores. Las velocidades de pico alcanzadas eran de 3.1Mbps en el *downlink* y 384kbps en el *uplink*. Sin embargo, el estándar fue poco atractivo y generó mucho debate entre las operadoras sobre la elección entre EV-DV o EV-DO, en primer lugar los operadores tradicionales preferían EV-DV ya que no era necesario adquirir una nueva banda y no era necesario agregar nada extra para que fuera compatible con las versiones anteriores. En cambio, los operadores nuevos se decantaban por EV-DO debido a que el costo de la red era reducido al estar basado en IP y no requerían que fueran compatibles. El estándar EV-DV no fue implementado por ningún operador provocando así la paralización de su desarrollo.

Por su parte el 3GPP desarrolló el primer sistema de tercera generación conocido como *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* para que fuera el sucesor de las tecnologías de segunda generación basadas en GSM. Fue implementado por primera vez en Japón en enero del año 2001 por el NTT DoCoMo (antes conocida como NTT). La mayoría de los cambios del sistema se hicieron en la red de acceso; las estaciones bases pasaron a denominarse *Node-B* y los controladores como *Radio Network Controller (RNC)*, sin embargo se mantuvieron los elementos de la *Core Network* de GSM con las modificaciones introducidas por GRPS y EDGE, logrando ofrecer a los operadores de red una opción de migración a 3G sin necesidad de una gran inversión.

UMTS utiliza WCDMA (*Wideband CDMA*) como estándar de transmisión radio, usando canales de 5MHz (más grandes en comparación a los usados en las tecnologías CDMA de segunda generación) que permiten manejar más de 100 llamadas simultáneamente y soportar velocidades de transmisión de hasta 2Mbps en su versión original. Asimismo UMTS introduce especificaciones que permiten modos de duplexado FDD (*Frequency Division Duplexing*) y TDD (*Time Division Duplexing*). El primero utiliza dos bandas de frecuencias, separadas entre sí, para los enlaces *uplink* y *downlink*. En cambio en el segundo modo, ambos enlaces están separados en tiempo y ocupan una misma banda de frecuencia, es utilizado principalmente cuando el espectro está limitado y no hay bandas pares (*paired bands*) disponibles [6]. FDD está enfocado para celdas grandes con usuarios con movilidad UMTS utiliza WCDMA (*Wideband CDMA*) como estándar de transmisión radio, usando canales de 5MHz (más grandes en comparación a los usados en las tecnologías CDMA de segunda generación) que permiten manejar más de 100 llamadas simultáneamente y soportar velocidades de transmisión de hasta 2Mbps en su versión original. Asimismo UMTS introduce especificaciones que permiten modos de duplexado FDD (*Frequency Division Duplexing*) y TDD (*Time Division Duplexing*). El primero utiliza dos bandas de frecuencias, separadas entre sí, para los enlaces *uplink* y *downlink*. En cambio en el

segundo modo, ambos enlaces están separados en tiempo y ocupan una misma banda de frecuencia, es utilizado principalmente cuando el espectro está limitado y no hay bandas pares (*paired bands*) disponibles [6]. FDD está enfocado para celdas grandes con usuarios con movilidad total y TDD es usado en celdas pequeñas (como picoceldas) para usuarios con movilidad local.

Entre otras características del sistema se puede mencionar que emplea un *chip rate* de 3.84Mchips/s con un esquema de modulación QPSK para el *downlink* y BPSK para el *uplink*. Además posee un funcionamiento flexible y adaptativo, ya que la cantidad de chips que representan 1bit varía según el estado del canal, también soporta hasta tres tipos de *handover* (*hard*, *soft* y *softer*).

3.1.4. Transición Actual

Las tecnologías de tercera generación, incluyendo todas sus evoluciones, son las que actualmente predominan a nivel mundial en cuestión de crecimiento tanto a corto como a largo plazo, una muestra de ello se refleja en la Figura 3.2, donde se puede observar cómo la cantidad de usuarios de 3G y posteriores ha ido aumentando en los últimos años y como se espera que más operadoras emigren a partir de este año.

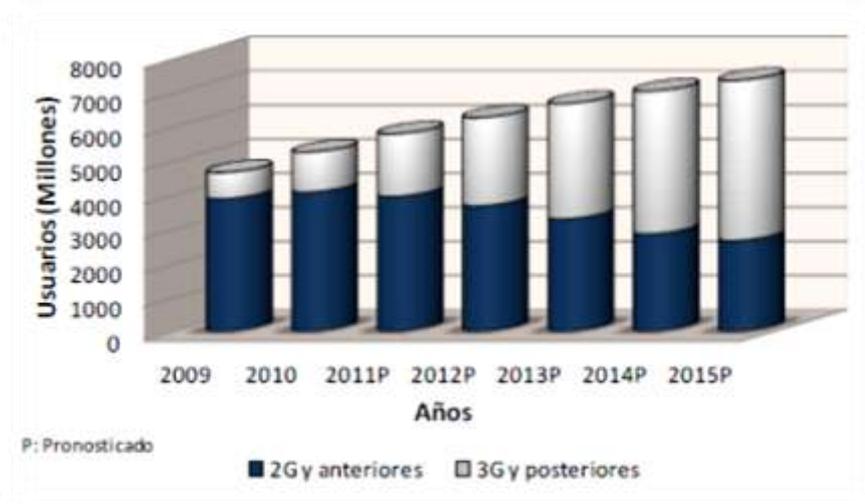


Figura 3.2: Pronóstico de cantidad de usuarios por tecnología móvil

Básicamente estas tecnologías buscan reducir el tiempo de latencia y aumentar la velocidad de transmisión generando de esta forma una mejora y crecimiento en los servicios.

El 3GPP2, sabiendo la preferencia de las operadoras basadas en CDMA2000 por adoptar EV-DO sobre EV-DV, decidió seguir desarrollando el estándar hasta generar la

primera optimización que se conoce como *Revision A*, implementada por primera vez en octubre del año 2006. De esta forma se incrementaron los valores de velocidad de pico en el *downlink* a 3.1Mbps y en el *uplink* a 1.8Mbps, a través de modulaciones de más alto nivel, pero utilizando el mismo ancho de banda de canal de 1.25MHz.

Posteriormente, una nueva evolución denominada *Multicarrier EV-DO*, basada en la *Revision B*, fue implementada comercialmente en el año 2010, es una tecnología multiportadora de banda ancha que incrementa la capacidad de la red a través de actualizaciones tanto de hardware como de software. Además, gracias a la suma de múltiples7 canales de 1.25MHz usados en la Revisión A puede llegar a ofrecer velocidades de pico de datos de hasta 14.7Mbps en un canal de 5MHz en el *downlink*; de igual forma aporta un aumento en la capacidad del *uplink* de un 65% como consecuencia del uso de técnicas como la cancelación de interferencia, logrando alcanzar velocidades de pico de hasta 5.4Mbps. Asimismo posee características como la compatibilidad con las versiones EV-DO anteriores, QoS avanzado, muy baja latencia y brinda la capacidad de soportar servicios como los mencionados anteriormente.

Por su parte el 3GPP continuó la evolución del sistema UMTS, logrando incorporar los estándares HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) en la *Release 5* y posteriormente el HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) en la *Release 6*, la unión de ambos se denomina simplemente HSPA. El crecimiento de HSPA desde su lanzamiento comercial en el 2005, supera en casi un factor de diez a la tecnología de segunda generación GSM como se observa en la siguiente figura:

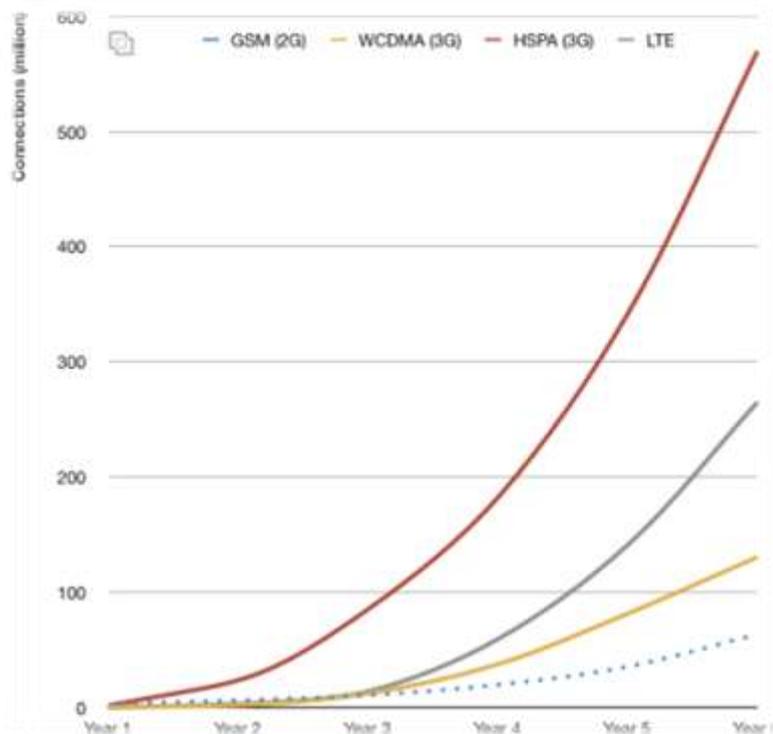


Figura 3.3: Adopción de las tecnologías móviles después de su lanzamiento

3.1.5. Cuarta generación (4G)

La evolución de las tecnologías de tercera generación dio un paso más hacia adelante hasta llegar a lo que se considera como sistemas de 4G. Inicialmente algunos de los estándares mencionados a continuación no se consideraban parte de los sistemas de cuarta generación a pesar de los aportes notables que ofrecían, y se les conocía como 3.9G por no cumplir con los requisitos emitidos por el ITU-R (*ITU Radiocommunication Sector*). Sin embargo, esta decisión fue modificada en diciembre del 2010, más que todo como una estrategia de marketing y no como una referencia a la tecnología implicada.

Inicialmente surgió la evolución del estándar de HSPA, mejor conocido como HSPA+ o Evolved HSPA, en la *Release 7* de las especificaciones del 3GPP; ofreciendo velocidades de pico de hasta 84Mbps de bajada (*downlink*) y 22Mbps de subida (*uplink*) utilizando técnicas de múltiples antenas (MIMO).

Asimismo dentro de este avance se puede destacar el proyecto UMB (*Ultra Mobile Broadband*) propuesto por el 3GPP2 como una mejora del sistema CDMA2000,

pero cuyo desarrollo fue detenido en el 2008 dado el poco interés que mostraban en él los operadores.

Por otra parte, el IEEE, desarrolló un sistema denominado *WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access)* con las variantes 802.16 2004 (para fijos), 802.16 e (soporte para móviles) y 802.16 m; los dos primeros no habían sido diseñados con énfasis en movilidad y compatibilidad con los *core network* de los operadores, sin embargo, el último si cumplía con las necesidades esperadas volviéndose la principal competencia del estándar *LTE (Long Term Evolution)* desarrollado por el 3GPP, y sobre el cual está basado este trabajo. Los inicios de LTE datan del año 2004, con un proyecto que llevaba el mismo nombre, enfocado a mejorar la tecnología de acceso radio *UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access)* y optimizar la arquitectura de la red de acceso. Fue en el año 2008 cuando las especificaciones fueron lo suficientemente fiables y estables como para la implementación comercial [7].

Un resumen de la evolución de los sistemas desde la segunda generación hasta la actualidad se puede observar en la figura 3.4, donde además se muestra los estándares más avanzados de cuarta generación *LTE-Advanced* y *WiMAX 802.16 m*.

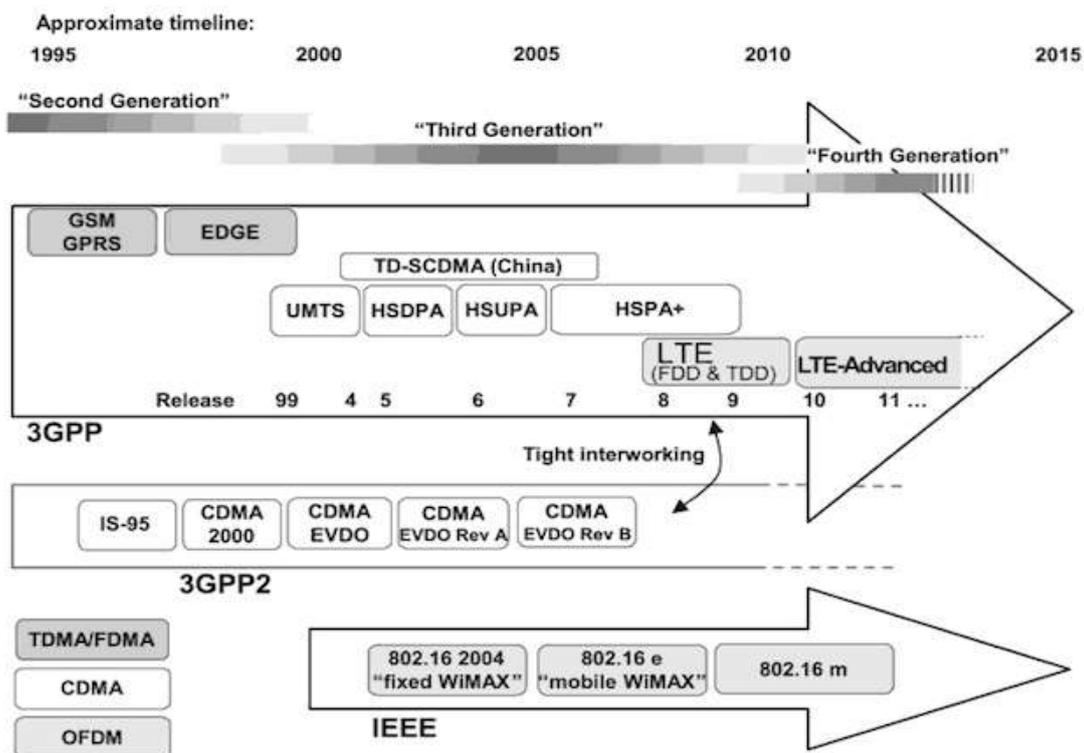


Figura 3.4: Evolución de las tecnologías más relevantes de la telefonía móvil (2G a 4G)

3.1.6. LTE (*Long Term Evolution*)

LTE es una tecnología de redes móviles desarrollada por el 3GPP considerada como de cuarta generación. Entre las principales características que posee el sistema LTE cabe mencionar[8] [9]:

- Está basado en conmutación de paquetes, es decir, que no tiene partes operando en conmutación de circuitos.
- Emplea las técnicas de acceso múltiple OFDMA para el *downlink* y SC-FDMA para el *uplink*. [8]
- Ancho de banda escalable entre los valores 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz.
- Velocidades de transmisión de pico alcanzables superiores a los 100Mbps y 50Mbps en el *downlink* y *uplink* respectivamente (con modulaciones de alta eficiencia).
- Posee una mejor calidad de servicio a través de la reducción del tiempo de latencia, tanto en el plano de usuario como de control.
- Mejora la eficiencia espectral con respecto a los sistemas anteriores en un orden de 3 aproximadamente pudiendo llegar a valores de pico de 5/bits/Hz (a velocidades de 100Mbps sobre una canalización de 20MHz).
- Nueva arquitectura de la red troncal, mucho más simplificada, más “plana”.
- Red basada completamente en IP, lo que se traduce en equipos más económicos y de fácil adquisición.

3.1.6.1. Arquitectura del Sistema LTE

Una representación de la arquitectura del sistema LTE, denominado formalmente como *Evolved Packet System* (EPS), se puede observar en la Figura 3.5. Está conformado por tres componentes básicos: equipo de usuario, red de acceso (E-UTRAN) y red troncal (EPC).

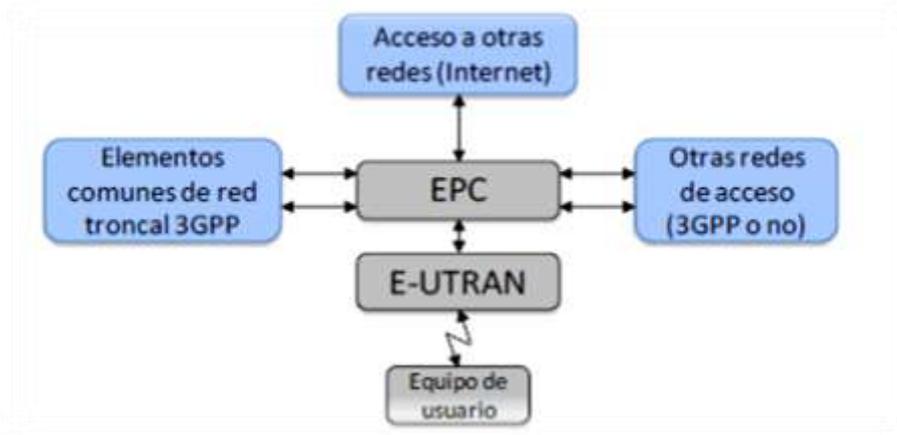


Figura 3.5: EPS - Arquitectura del sistema LTE

El equipo de usuario o UE (*User Equipment*) es el dispositivo empleado por el usuario para poder acceder a los servicios de la red. La conexión entre el equipo de usuario y la red de acceso se realiza a través de una interfaz radio.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC en conjunto son las encargadas de proporcionar servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuarios y redes externas como Internet, entre otras, denominados formalmente como servicios portadores *EPS* o *EPS Bearer Service*, cuyas prestaciones en términos de *throughput*, retardos y pérdidas, pueden ser configuradas según el servicio final (videoconferencia, navegación web, etc.) al cual estén asociados.

Cabe destacar la capacidad que tiene el sistema LTE de permitir el acceso a sus servicios a través de otras redes acceso sean estas 3GPP o no. [8]

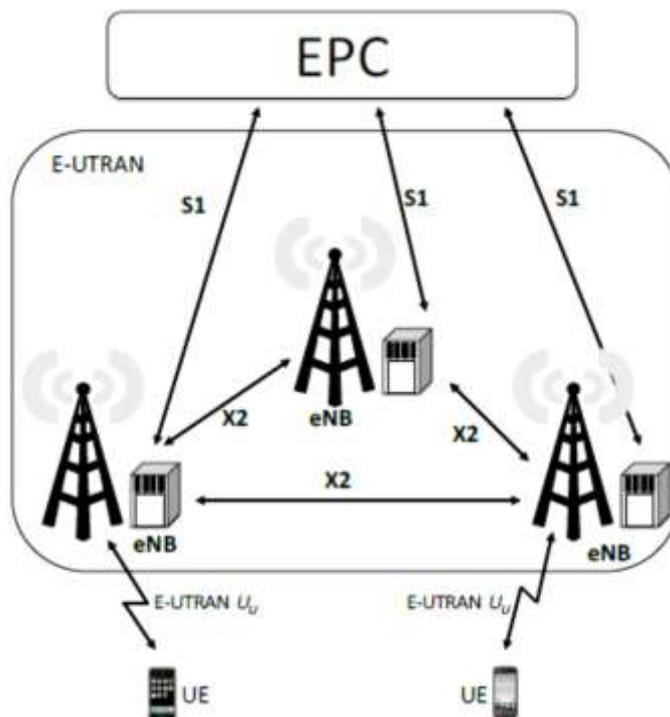


Figura 3.6: Red de acceso E-UTRAN e interfaces [14]

En esta figura se puede observar la arquitectura e interfaces de la red de acceso, la cual está compuesta únicamente por la estación base denominada *evolved NodeB* (eNB), a diferencia de los sistemas móviles previos los cuales estaban compuestos por estaciones base y equipos controladores de estaciones base. Los eNBs proporcionan la conectividad entre los equipos de usuarios UE y la red troncal EPC. Además presentan tres interfaces de nombre E-UTRAN UU, S1 y X2 que le permiten comunicarse con el resto de elementos del sistema.

La primera es la E-UTRAN UU, también conocido como interfaz radio LTE, la cual permite la transferencia de información a través del canal radio en los eNBs y UEs. Todas las funciones y protocolos requeridos para efectuar el envío de datos y controlar el funcionamiento de la interfaz radio se implementan en el eNB. [4][8]. La transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina servicio portador radio o *Radio Bearer* (RB).

Una de las características que posee el sistema y que permite reducir el tiempo de latencia ocurre en el plano del control [9], en el que se hace uso de una conectividad de tipo “*always on*”, en la que cada eNB mantiene cierta información almacenada sobre todos los UE que tenga conectados (estado del equipo, servicios portadores activos, capacidades del sistema, etc.) para así mantener los servicios de E-UTRAN activos.

La segunda, es una interfaz opcional que conecta a los eNBs entre sí y se denomina X2. Dicha interfaz está directamente relacionada con la gestión de los recursos radio, que es una de las funciones claves de la red de acceso LTE. Los eNBs, además de realizar funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, asignación dinámica de recursos radio, tanto en el *downlink* como el *uplink* (conocida como funciones de *scheduling*), control de movilidad, control de reporte de medidas de los equipos de usuario que puedan ser útiles para la gestión de recursos, etc., podrían hacer uso de la interfaz X2 para enviar los mensajes de tráfico de los usuarios cuando estos realicen un *handover*, o también mensajes de señalización con el objetivo de reducir la interferencia entre eNBs [9].

Por último existe la interfaz denominada S1 que conecta los eNBs con la red troncal EPC, dicha interfaz está formada a su vez por dos interfaces más de nombre S-GW (*Gateway*) y S-MME (*Mobile Management Entity*) asociadas al plano de control y al plano de usuario respectivamente [9].

3.1.6.2. Tecnologías de Nivel Físico

Una de las principales características que poseen los sistemas de última generación, como LTE, es la tecnología que implementan a nivel físico, ya que permite utilizar de forma más eficiente los recursos radio disponibles en comparación a los sistemas previos [8]. LTE utiliza las técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA para los enlaces descendente (*downlink*) y ascendente (*uplink*) respectivamente, ambas basadas en la técnica de transmisión FDMA.

3.1.6.2.1. Bases del Acceso Múltiple en LTE.

Una transmisión de portadora única (*Single Carrier, SC*) se traduce en que toda la información está modulada y contenida en una sola portadora que ocupa una banda de frecuencia definida como se muestra en la figura 3.7, cuyas características como fase, frecuencia y amplitud pueden ser ajustadas por un transmisor que tenga las capacidades adecuadas.

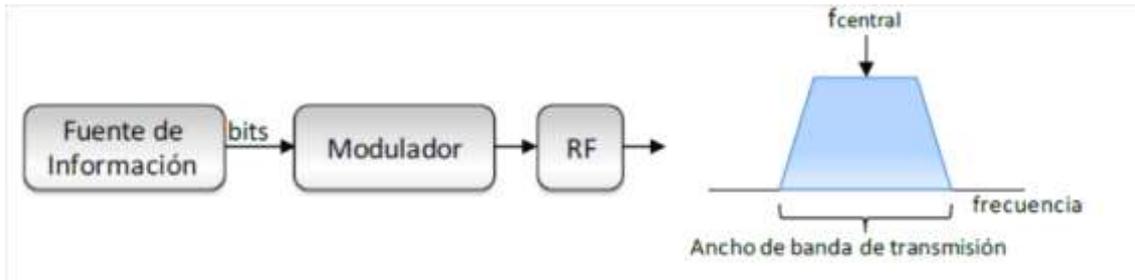


Figura 3.7: Transmisor de portadora única

En el concepto de FDMA, cada usuario utiliza una frecuencia portadora o subportadora distinta como se muestra en figura 3.8 con el fin de acceder al sistema de forma simultánea, dichas portadoras han de estar lo suficientemente separadas y sus formas de onda han de ser adecuadas como para no causar una excesiva interferencia entre sí [9], pero que tampoco estén demasiado separadas ya que se estaría haciendo un mal uso del espectro.

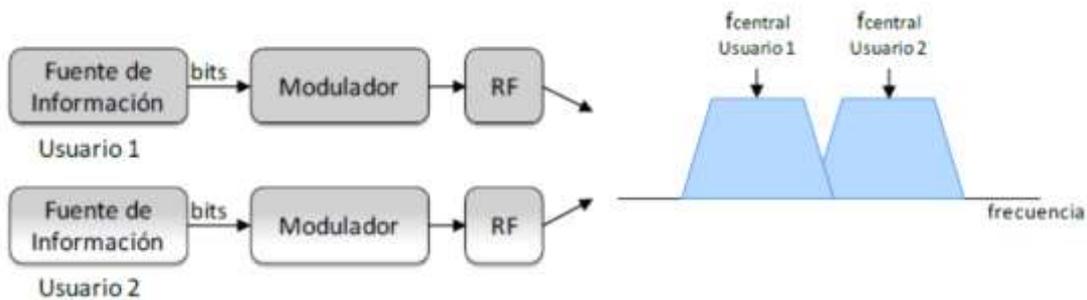


Figura 3.8: Transmisor basado en concepto FDMA

Por otra parte, el concepto de una señal multi-portadora se muestra en la figura 3.9 en la que los bits de información son repartidos sobre las distintas subportadoras de un mismo transmisor utilizando, como por ejemplo, un banco de filtros y con igual separación entre subportadoras [9].



Figura 3.9: Transmisor basado en concepto multi-portadora

Del mismo modo, existe la técnica de transmisión OFDM que constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora basado en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí [8]. Las propiedades de ortogonalidad permiten que a pesar de que los espectros de las subportadoras estén superpuestos, esto no represente un impedimento para la separación en recepción y posterior recuperación de los símbolos transmitidos. En la figura 3.10 se observa un ejemplo de una señal OFDM en frecuencia formada por 4 subportadoras y en donde se indica el punto de muestreo óptimo de una subportadora y el valor nulo del resto para este punto.

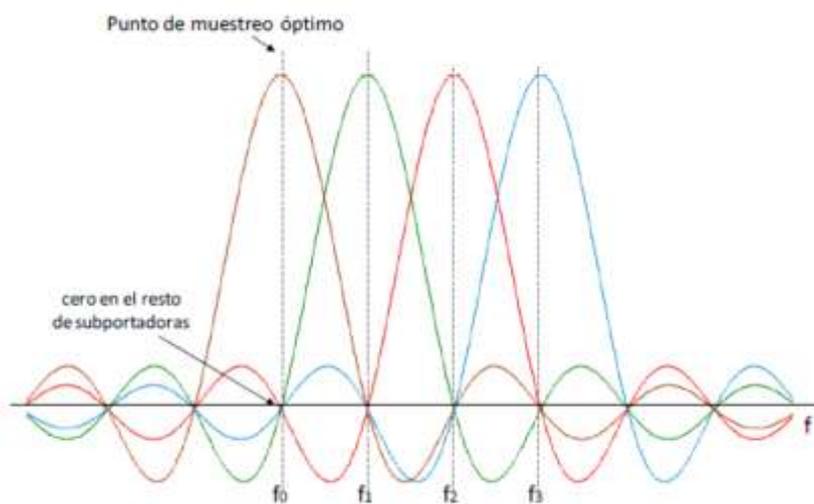


Figura 3.10: Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM

3.1.6.2.2. Fundamentos OFDMA.

En el sistema LTE la implementación práctica de los moduladores y demoduladores se hace mediante técnicas basadas en la transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) y su operación inversa (IDFT – *Inverse DFT*) para manipular la representación de una señal entre tiempo y frecuencia según se requiera; aunque comúnmente en la implementación se utilizan sus versiones rápidas FFT y su inversa IFFT con la finalidad de acelerar el proceso de cálculo, haciendo obligatorio que el número de muestras a la entrada sea necesariamente una potencia de 2 lo cual está relacionado directamente con los anchos de banda de canalización que se puedan utilizar [9][4].

La técnica de acceso OFDMA es utilizada por el sistema LTE para el enlace descendente. En el esquema de la figura 3.11 se puede observar las etapas por las que atraviesa la señal en el transmisor y en el receptor. En el transmisor los bits de la señal de entrada pasan por un conversor serie-paralelo formando N flujos de información, cada flujo será mapeado posteriormente, es decir, asignado a una subportadora distinta. Posteriormente con la IFFT de N muestras se pasa la señal al dominio del tiempo, se pasa nuevamente la señal a serie y se le agrega el prefijo cíclico. Por último se convierte la señal a analógica y se transmite por el canal radio.

El motivo por el cual se agrega el prefijo cíclico es evitar la interferencia intersimbólica (ISI), ya que a pesar de que las subportadoras sean ortogonales entre ellas, estas tienen que atravesar el canal radio, sobre el cual se generan una serie de fenómenos (difracción por obstáculos, las reflexiones múltiples, etc.) que afectan a la señal según el entorno donde esté el terminal móvil receptor [8][4]. Por lo tanto, la señal recibida es una suma de la original junto con otras réplicas originadas por los distintos caminos de propagación existentes en el canal, cada réplica es recibida en instantes de tiempo diferentes y con amplitudes y fases distintas. Sin embargo, para suprimir la interferencia ISI es necesario asegurar que la duración del prefijo cíclico sea mayor al máximo retardo de las componentes multicamino. El mecanismo para agregar el prefijo cíclico consiste en repetir al principio de la señal las muestras finales resultantes del proceso de modulación, lo cual resulta muy sencillo tomando en cuenta que el transmisor hace uso del IFFT.

El esquema del receptor también se muestra en la figura 3.11, en él se hace exactamente los mismos procedimientos pero contrarios al del transmisor. En la etapa de demapeado se utiliza un ecualizador para poder reducir los efectos de la respuesta frecuencial del canal dado que no es constante y origina que cada subportadora vea una respuesta frecuencial de canal distinta.

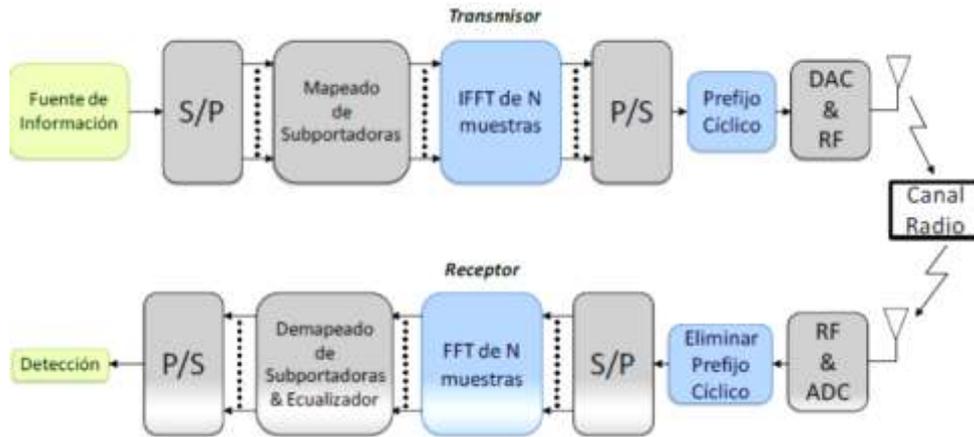


Figura 3.11: Estructura de Transmisor y Receptor OFDMA

La aplicación de los conceptos mencionados anteriormente son los que permiten utilizar esta técnica en el enlace descendente, en donde los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pueden pertenecer a distintos usuarios. Por lo tanto es posible acomodar varias transmisiones simultáneas pertenecientes a distintos flujos de información de cada usuario como se representa en la figura 3.12.

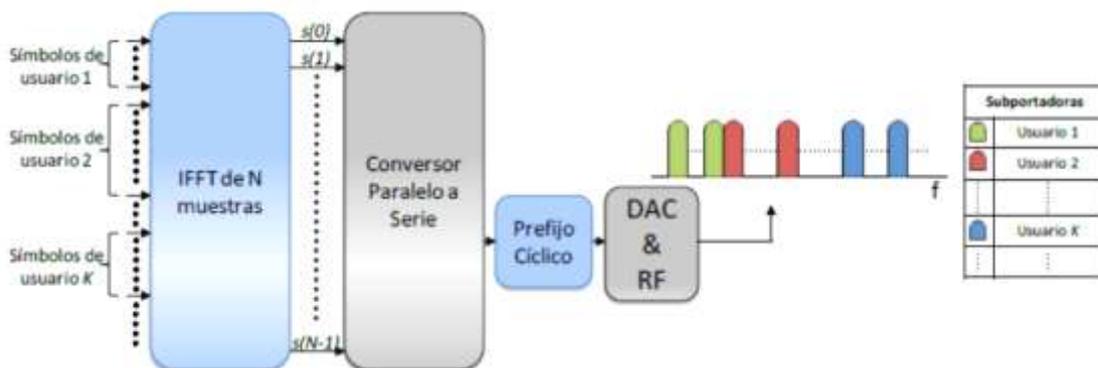


Figura 3.12: Multiplexación de usuarios en OFDMA

Es importante mencionar que a pesar de que en el ejemplo de la figura 3.12 cada usuario tiene asignado un conjunto de subportadoras contiguas, esto no necesariamente tiene porque ser así, sino que los símbolos de un usuario también podrían estar en subportadoras no contiguas [8][9].

El empleo de OFDMA conlleva las siguientes ventajas:

- **Diversidad multiusuario:** al utilizar OFDMA la asignación de subportadoras a usuarios se realiza de forma dinámica, a través de técnicas de *scheduling*, pudiéndose modificar en períodos cortos de tiempo. Dado que el canal radio presenta desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras (independiente al usuario que las tengas asignadas) se puede intentar seleccionar para cada subportadora el usuario que presente mejor estado del canal (según la relación señal a ruido que perciba) lo que se traduce en un uso más eficiente del espectro obteniendo mayores velocidades de transmisión.
- **Diversidad frecuencial:** existe diversidad frecuencial dado que es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas y que estén lo suficientemente separadas como para que el estado del canal sea independiente entre ellas.
- **Robustez frente a la propagación multicamino:** gracias al uso del prefijo cíclico como se mencionó anteriormente, la técnica OFDMA es muy robusta frente al ISI y es posible combatir la distorsión utilizando técnicas de equalización en el dominio frecuencial.
- **Velocidad de transmisión escalable:** mediante la posibilidad de asignar una cantidad mayor o menor de subportadoras a cada usuario.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** como la banda total esta subdividido en un conjunto de subportadoras de banda estrecha que se asignan de forma dinámica a los usuarios, se dispone de una alta granularidad al poder asignar más o menos recursos a cada uno, lo cual es útil para acomodar servicios con distintos requerimientos de calidad.
- **Sencillez de implementación en el dominio digital:** gracias a la posibilidad de emplear chips que efectúan los procesos de FFT/IFFT de forma rápida.

De igual forma la técnica OFDMA también presenta una serie desventajas:

- **Relación entre potencia instantánea y potencia media elevada:** es uno de los mayores inconvenientes, ya que representa un problema de linealidad para los amplificadores de potencia, limitando su eficiencia e incrementando su coste.
- **Sensibilidad a los errores de frecuencia:** dicha sensibilidad proviene del concepto de ortogonalidad entre las subportadoras, ya que pueden existir desplazamientos de frecuencia causado por factores como la estabilidad de los osciladores o el efecto Doppler dado por los movimientos de los terminales, entre otros, lo que se traduce en una pérdida de ortogonalidad y por consiguiente la aparición de interferencia entre subportadoras.
- **Reducción de la velocidad de transmisión:** dado que al agregar un prefijo cíclico para combatir el ISI se está incrementando la duración del símbolo OFDM.

3.1.6.2.3. Parámetros de OFDMA empleados por LTE.

A continuación se presentan los parámetros OFDMA definidos en el contexto del enlace descendente de LTE basándose en [8]:

La separación entre subportadoras es de $\Delta f = 15 \text{ kHz}$, aunque también existe una posibilidad de que sea 7.5 kHz pero enfocado a transmisiones *multicast* en redes iso-frecuenciales (SFN, *Single Frequency Network*).

Las subportadoras son agrupadas en un bloque de 12 subportadoras contiguas, con un ancho de banda resultante de 180 kHz , representando la mínima unidad asignable a un usuario en el dominio frecuencial. Por lo tanto el número de subportadoras que ocupa una portadora LTE en el *downlink* es $N_s = 12 N_B + 1$, es decir, la suma del número de bloques de 12 subportadoras (N_B) utilizados más la subportadora central que no es utilizada por ninguno de los bloques debido a la posibilidad de presentar una alta interferencia causada por el oscilador local en recepción.

La flexibilidad en el ancho de banda de transmisión ocupado viene dado por el número de N_B utilizados de forma tal que $BW_{Tx} = (12N_B + 1) \cdot \Delta f$, el cual está relacionado a su vez con el ancho de canal LTE como se muestra en la tabla 3.1. En todos los casos el porcentaje de banda ocupado es del 90% excepto en el caso de 1.4 MHz que es el 78%. Asimismo la selección de una configuración u otra en términos de número de bloques empleados se controla mediante el número de muestras N usado en los procesos de *IFFT/FFT* y sus correspondientes frecuencias de muestreo dado por $f_m = N \cdot \Delta f$ como se aprecia en la misma tabla 3.1

$BW_{canal} \text{ (MHz)}$	1.4	3	5	10	15	20
N_B	6	15	25	50	75	100
$BW_{Tx} \text{ (MHz)}$	1.095	2.715	4.515	9.015	13.515	18.015
$N_{IFFT/FFT}$	128	256	512	1024	1536	2048
$f_m \text{ (MHz)}$	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72

Tabla 3.1: Valores de parámetros usados el *downlink* para cada ancho de banda de canal

Por último cabe destacar que la duración del prefijo cíclico varía dependiendo del tipo de trama que se esté utilizando en caso de emplear el modo TDD, o de la cantidad de símbolos por slot para el modo FDD. Las modulaciones que se pueden emplear en este enlace son QPSK, 16QAM y 64QAM.

3.1.6.2.4. Fundamentos SC-FDMA

SC-FDMA es una técnica de modulación híbrida que combina las ventajas de los sistemas OFDMA, como la flexibilidad en la elección de las subportadoras y la robustez ante la propagación multicamino, con una relación PAPR (Potencia instantánea-potencia media, *Peak to Average Power Ratio*) mucho menor en comparación a la del sistema OFDMA nativo y que es característico de las modulaciones de portadora única.[4] [9] Esta combinación de características fue la razón para elegirla como técnica de acceso múltiple en el enlace ascendente del sistema LTE, especialmente la última ya que al ser una técnica utilizada en el terminal móvil no es posible requerir amplificadores que consuman mucha potencia y que como consecuencia reduzcan la duración de la batería del equipo.

El esquema del transmisor y receptor se muestra en la figura 3.13, en ella se observan que las etapas por las que tiene que pasar la señal son sumamente similares al caso OFDMA, la única diferencia que existe (en el caso del transmisor) es la adición de una DFT de K muestras con el propósito de precodificar los K símbolos a transmitir antes de realizar la transmisión OFDM utilizando una IDFT de N muestras. Dado que $N > K$, el resto de entradas de la IDFT que no se encuentren ocupadas por la información a transmitir tendrán un valor de cero, el resultado de este proceso es una señal de portadora única (*single carrier*) que presenta propiedades de PAPR mejor que las señales multiportadora y cuyo ancho de banda de valor $BW_{SC} = k\Delta f = K \cdot fm/Nes$ regulable simplemente modificando el valor de K , lo que permite generar la característica de flexibilidad en la banda asignada. Además escogiendo las entradas de la IDFT sobre la cual se introducen los K símbolos se puede variar el rango de frecuencias sobre la cual se posicionará la señal resultante. Análogamente sucede lo mismo con el receptor.

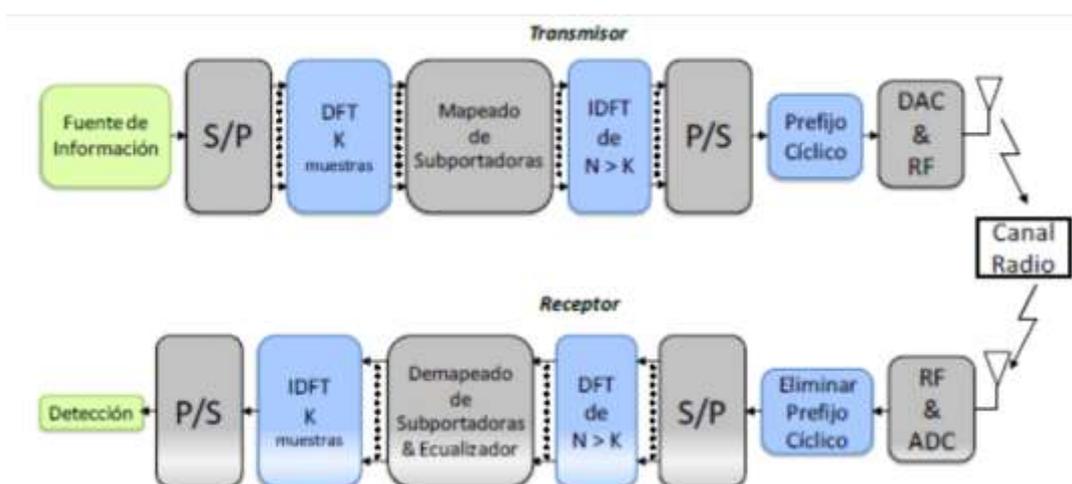


Figura 3.13: Estructura de Transmisor y Receptor SC-FDMA

Al igual que en OFDMA el valor de la muestras N de los IDFT/DFT suele ser una potencia de dos, por lo que se puede utilizar la versión rápida IFFT/FFT respectivamente.

Es importante mencionar que se pueden colocar las K muestras a la salida del DFT (después de haber sido mapeadas) en posiciones no contiguas a la entrada del IDFT, generando así un esquema que se denomina SC-FDMA distribuido. A pesar de que existe esta posibilidad, la misma no se utiliza. En cambio, el esquema utilizado en LTE se conoce como localizado en el que las K muestras se ubican en posiciones contiguas sobre el IDFT, esto se debe a que, a diferencia del anterior, este esquema es menos sensible a los errores de frecuencia [8][9].

El mecanismo de multiplexación de las transmisiones de diferentes usuarios se puede observar en la figura 3.14, en donde cada usuario ubica sus distintas K muestras en posiciones distintas a la entrada del IDFT de modo que ambas transmisiones ocupen bandas frecuenciales diferentes con un valor de ancho de banda igual a $K_{usuario}\Delta f$.

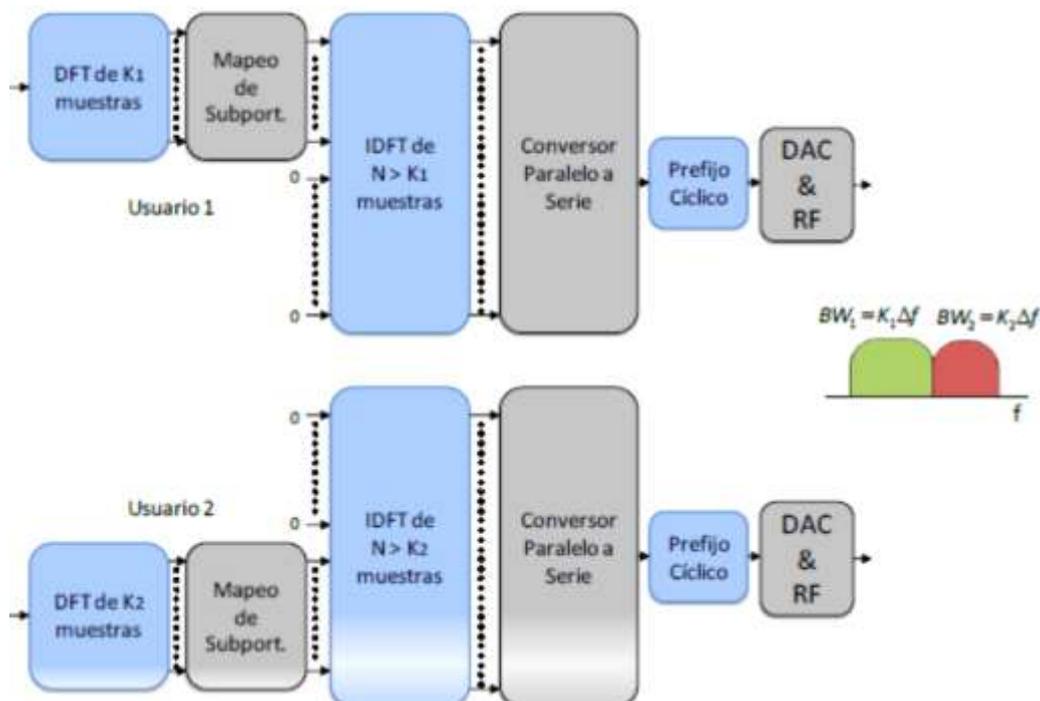


Figura 3.14: Multiplexación de usuarios con SC-FDMA

3.1.6.2.5 Parámetros SC-FDMA empleados por LTE.

En general los parámetros SC-FDMA son muy similares a los usados en el enlace descendente. La separación entre subportadoras es $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ agrupadas en bloques de 12 subportadoras cada uno. Estos bloques pueden ser asignados de forma flexible a los diferentes usuarios con la única limitación que las subportadoras asignadas a un único usuario han de ser contiguas.

A diferencia del enlace descendente, el número de subportadoras disponibles estará dado por $N_S = 12N_B$ ya que no se deja de usar la subportadora central gracias a la pre-codificación basada en la DFT que hace que la posible interferencia del oscilador local quede dispersada en toda la banda ocupada. En relación a los valores de tiempo de símbolo y prefijo cíclico son los mismos que en el *downlink* [8] Las modulaciones en el enlace ascendente pueden ser *QPSK*, *16QAM* y *64QAM* (para terminales de categoría 5).

3.2. Software-Defined Radio: principios y evolución hacia Cognitive Radio.

3.2.1. SDR

El término SR (*Software Radio*) fue acuñado por Joseph Mitola III en el año 1991 para referirse a un tipo de radios reprogramables o reconfigurables [10], es decir, equipos donde un mismo elemento de hardware es capaz de realizar diferentes funciones, en distintos instantes de tiempo, con la introducción de cambios en su configuración mediante software.

Idealmente, en un sistema SR la digitalización de la señal se realiza a pie de antena. Sin embargo, el estado actual de la tecnología hace que un sistema SR ideal no se pueda implementar.

Por este motivo, comúnmente se considera que un SDR (*Software-Defined Radio*) es una versión de un SR implementable con la tecnología disponible actualmente, donde la conversión se realiza en la etapa de IF, tras un filtrado selectivo.

3.2.1.1. Estructura de SDR

La estructura básica de un sistema SDR se compone de tres bloques o etapas, tal y como se muestra en la Figura 3.15. La etapa de RF se encarga de transmitir-recibir las señales de radiofrecuencia para, en el caso de recepción, adecuarlas y convertirlas a frecuencia intermedia o bien, en el caso de transmisión, amplificar y modular las señales de IF adecuándolas para su posterior transmisión vía radio.

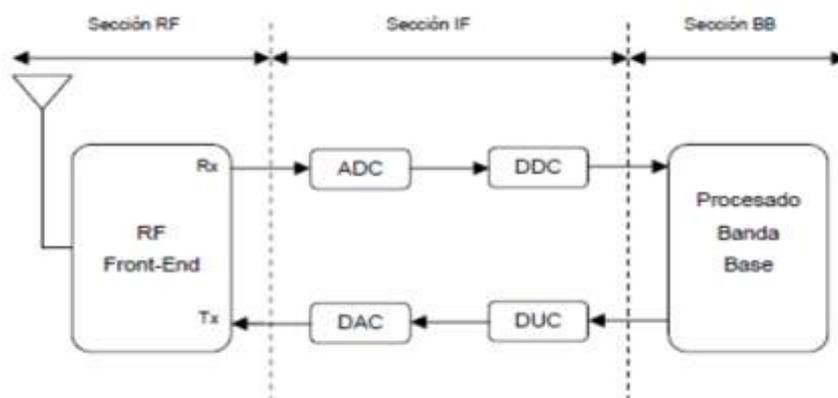


Figura 3.15: Diagrama de bloques de SDR.

La etapa de IF se encarga, en recepción, de digitalizar la señal de IF (ADC) y su posterior conversión a banda base (DDC, *Digital Down Conversion*) o viceversa (DUC, *Digital Up Conversion*), en el caso de transmisión[10]. Por último, la etapa de Banda Base es la encargada de todo el procesamiento digital en banda base de la señal y, en algunos casos, de la implementación de protocolos del nivel de enlace del modelo OSI (*Open System Interconnection*).

De las tres etapas, la de RF casi siempre trabaja con *hardware* analógico, mientras que las etapas de IF y Banda Base se implementan con módulos *hardware* digitales. Este *hardware* normalmente está constituido por una combinación de DSP (*Digital Signal Processor*) con FPGA (*Field Programmable Gate Array*) y ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*). La configuración o reconfiguración de dicho *hardware*, es decir, lo que realmente proporciona flexibilidad al sistema, se realiza mediante *software*. Este *software* se desarrolla utilizando diversas metodologías y herramientas para escritura de código y simulación de sistemas, como VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit / Hardware Description Language*) o similares.

La primera implementación conocida del concepto SDR fue el proyecto militar estadounidense *SpeakEasy* [11], cuyo objetivo principal era implementar más de 10 tipos de tecnologías de telecomunicaciones inalámbricas (las más usadas por el ejército americano) en un solo equipo programable, el cual operaría en un rango de frecuencias desde los 2 hasta los 200 MHz. Un objetivo adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para así tener en cuenta posibles futuros estándares

En la actualidad, el SDR Forum (*Software Defined Radio Forum*), grupo independiente formado por la industria, científicos, ingenieros y organismos reguladores, es el encargado de dirigir el desarrollo de la tecnología SDR. Desde el punto de vista técnico, se considera que SDR es una buena alternativa para la integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, pero su implementación comercial aun impone ciertos retos, sobre todo de tipo económico, pues los costes de los equipos necesarios son aun elevados[11]. Sin embargo, se espera que a corto plazo la tecnología evolucione lo suficiente, especialmente en el campo de la microelectrónica, como para que los estándares puedan adoptarlo y crear así un verdadero soporte a nivel capa física para la convergencia y la interoperabilidad, permitiendo así una evolución en los últimos años del concepto de SDR hacia un nivel superior como es *Cognitive Radio*.

3.2.2. Cognitive Radio

De una forma muy simple, se podría definir *Cognitive Radio* como un sistema SDR inteligente o cognitivo, como su propio nombre indica. De momento no existe ningún test para medir la inteligencia de un sistema radio, así que la definición precisa de *Cognitive Radio* ha generado, sorprendentemente, una cierta controversia entre investigadores y organismos oficiales.

Cognitive Radio aparece como una solución al bajo uso del espectro, ya que permite un uso del mismo de manera flexible, eficiente y fiable a partir de la capacidad de adaptar en tiempo real las características de operación a las condiciones del entorno. Los dispositivos *CR* podrían explotar de manera inteligente amplias bandas de espectro inutilizadas sin interferir a dispositivos que pudieran tener licencia de operación en estas u otras bandas frecuenciales [13].

El término *Cognitive Radio* fue acuñado por Joseph Mitola III en su tesis doctoral [13] en el año 1999. Dicha tesis estaba centrada principalmente en la descripción del RKRL (*Radio Knowledge Representation Language*), mientras que un dispositivo *CR* se presentaba como una pequeña parte del mundo físico, capaz de detectar las necesidades de comunicación de su usuario, y, mediante la adquisición de conocimiento de su entorno, disponer los mecanismos adecuados para satisfacer dichas necesidades. Según la definición del propio Mitola:

Las características básicas que debería poseer un sistema *Cognitive Radio* son:

- Poder actuar tanto de transmisor como de receptor.
- Ser capaz de percibir el entorno en el que opera, mediante técnicas de *spectrum sensing*.
- Poseer conciencia de dicho entorno, así como de sus propias capacidades y recursos.
- Ser capaz de variar y adaptar, de forma inteligente, sus parámetros de transmisión/recepción.
- Operar de forma autónoma.

Según la FCC (*Federal Communications Commission*) [14], un dispositivo *CR* debería ser capaz de reconfigurar los siguientes parámetros:

- *Frecuencia Portadora*: Basándose en la información sobre el espectro radioeléctrico disponible y del tipo de transmisión a realizar, el dispositivo debería ser capaz de seleccionar la frecuencia portadora más adecuada.
- *Modulación*: El dispositivo debería ser capaz de seleccionar el tipo de modulación más adecuado en función de las características de canal y

los requerimientos del usuario. Por ejemplo, existen aplicaciones en las que la tasa de transmisión es más importante que la de error, lo que requeriría modulaciones con una alta eficiencia espectral.

- *Potencia transmitida*: Si por cualquier motivo las características del medio permitiesen una reducción en la potencia transmitida, el dispositivo CR debería reducirla hasta un cierto nivel de manera que continuara manteniendo la calidad de la transmisión pero, a la vez, permitiera aumentar el número de usuarios compartiendo espectro, reduciendo la interferencia entre ellos.
- *Sistemas de comunicación*: Un sistema CR debería ser capaz de operar a través de distintos sistemas de comunicación.

En general, todos los parámetros de transmisión de un dispositivo CR deberían poder reconfigurarse no sólo al principio, sino también durante la transmisión, adaptándose a los cambios que se produzcan en su entorno. Además, existen otra serie de características adicionales, como por ejemplo:

- *Sensores de localización*: a la hora de implementar el *spectrum sensing*, se asume que el dispositivo CR tiene un cierto conocimiento de su posición, por lo que el sistema debería incorporar algún sistema de posicionamiento, como por ejemplo GPS (*Global Positioning System*) o Galileo.
- *Algoritmos de inteligencia artificial*: el dispositivo CR no solo monitoriza su entorno, sino que además, debería aprender de él.
- *Protocolos de comunicación*: para intentar minimizar las interferencias con los usuarios primarios o con otros dispositivos CR, sería necesario diseñar algún tipo de protocolo de comunicación. Además, si asumimos un entorno en el que varios dispositivos CR pretenden acceder a los mismos recursos, también sería necesario implementar algún tipo de protocolo para la *negociación*. En este aspecto, algunos autores han sugerido la utilización de resultados de la teoría de juegos [15].
- *Interfaz con el usuario*: a fin de mantener al mismo informado en todo momento.

Un escenario plausible es la explotación de los principios de *Cognitive Radio* en femtoceldas [16]. La relevancia de las femtoceldas en el marco actual de las radiocomunicaciones se describirá posteriormente en el apartado 2.5. En una visión más avanzada, una femtocelda podría operar no sólo en las bandas licenciadas al operador sino también en otras siguiendo los principios de *Cognitive Radio*, ya que la operación en interiores facilitaría el aislamiento radioeléctrico necesario.

3.3. Sistemas Femtocelulares

3.3.1. Introducción

Hasta ahora las comunicaciones móviles han estado basadas en grandes estaciones base llamadas macroceldas dedicadas a ofrecer servicios de voz y datos en una determinada zona, ya sea en escenarios urbanos cubriendo superficies de un radio de centenares de metros o en escenarios rurales en zonas de hasta dos kilómetros de radio.

Por otro lado, el aumento en la demanda de servicios de datos a alta velocidad ha dado lugar a la creación de nuevas tecnologías y estándares como WiMAX (802.16e), 3GPP *High Speed Packet Access* (HSPA) en Europa o 3GPP2 EVDO y UMB en Estados Unidos y Japón, incluso los nuevos nuevo estándares LTE y LTEA, el primero de incipiente implantación y el segundo en vías de desarrollo. En paralelo a los servicios móviles, la penetración de las redes Wi-Fi permite ofrecer servicios de alta velocidad en multitud de situaciones como hogares, oficinas, universidad, etc. Sin embargo, este tipo de redes son incapaces de ofrecer cobertura y servicios típicos de las redes celulares. A este hecho hay que añadir la saturación del mercado de las comunicaciones móviles desde el punto de vista de la creación de nuevos usuarios. Actualmente los operadores llevan a cabo una política de mejora de prestaciones a fin de aumentar el consumo de sus clientes y poder captar nuevos usuarios. Teniendo en cuenta dicha situación uno de los próximos objetivos de las redes móviles es poder competir con las redes Wi-Fi, ofreciendo servicios competitivos dentro de escenarios puramente interiores como hogares y oficinas[17].

Desde el sector de las telecomunicaciones se apunta a un crecimiento continuo en la velocidad de las redes móviles, tal como expresó Martin Cooper, director ejecutivo de Arraycomm “Los servicios inalámbricos doblarán su capacidad cada treinta meses” [19]. El modo de continuar con este crecimiento puede ser mediante un aumento del ancho de banda utilizado, o reducir el tamaño de las celdas de cobertura. La primera opción conlleva explotar un recurso limitado como es el espectro radioeléctrico, luego las operadoras se han decantado por la utilización de celdas cada vez más pequeñas. Sin embargo la demanda de tasas binarias ha seguido creciendo, de modo que continuar reduciendo el tamaño de dichas celdas comienza a convertirse en una solución muy costosa para los operadores debido a los altos gastos en infraestructura. Es en este punto donde entran en juego las picoceldas, metroceldas, microceldas, femtoceldas o en su nombre genérico *smallcells* (según el *Smallcell Forum*, antes llamado Femto Forum[17]).

3.3.2. Entonces, ¿qué es una femtocelda?

Básicamente una femtocelda es una pequeña estación base de baja potencia para el uso de servicios móviles en hogares o negocios. Dicha estación base se integra en la red móvil mediante una conexión de banda ancha, típicamente ADSL o fibra óptica, de modo que cuando el usuario entra en su casa, sea su propia red la encargada de ofrecerle cobertura 3G, sustituyendo automáticamente la ofrecida por el operador móvil correspondiente. [17]

Respecto al producto final, éste tendrá el aspecto de un router Wi-Fi tradicional; de hecho, fabricantes como NetGear, Cisco, Huawei, Airvana o Alcatel-Lucent llevan tiempo creando hardware incorporando ambas tecnologías.



Figura 3.16: Varios modelos de Femtoceldas actuales

La principal virtud de las femtoceldas consiste en que representan un enfoque positivo tanto para operadoras como usuarios. Estudios recientes [19] afirman que el 50% de las llamadas de voz, y más el 70% del tráfico de datos se realiza desde escenarios interiores. Visto esto, mediante el uso de femtoceldas todas estas transferencias mejorarían en calidad y capacidad. Desde el punto de vista de los operadores, éstos consiguen reducir la cantidad de tráfico en las macroceldas mejorando la calidad de los servicios en entornos exteriores, además de abrir un nuevo mercado del

que pueden surgir numerosas aplicaciones. Cabe destacar que la introducción de los sistemas femtocelda no pretende acabar con las redes tradicionales basadas en celdas de gran tamaño, el objetivo de éstas es la convivencia de ambas tecnologías a fin de buscar el beneficio global, es decir, mejorar los servicios ofrecidos dentro de los edificios a la vez que aumenta la calidad de estos en el exterior. A continuación se van a mostrar las principales ventajas del uso de una femtoceldas:

3.3.2.1. Aumento en la cobertura y capacidad

A pesar de la baja potencia de transmisión de una femtocelda, la relación señal a ruido, *SNR*, será elevada debido a las cortas distancias entre transmisor y receptor [19]. El beneficio inmediato será realizar llamadas y utilizar servicios de alta velocidad con cobertura máxima, además de otras ventajas subyacentes de la baja distancia del enlace, como un aumento en la duración de las baterías de los terminales o la creación de grupos cerrados en torno al punto de acceso.

3.3.2.2. Incremento global en la capacidad de la red

Respecto a los escenarios interiores, el aumento en la capacidad resulta inmediato al utilizar tecnología de femtocelda, sin embargo desde el punto de vista global de la red móvil ofrece otros beneficios. El primero de ellos es el aumento en la eficiencia espectral, ya que al utilizar celdas cubriendo superficies muy pequeñas el usuario accede a un ancho de banda mayor. La siguiente ventaja consiste en que el tráfico generado en hogares y oficinas sería absorbido por la red IP correspondiente, reduciendo la utilización de la red móvil clásica. Por lo tanto, debido a la reducción de usuarios de las macrocelda y a un aumento del espectro utilizable, también es de esperar un aumento en las velocidades ofrecidas a todos los usuarios macrocelda [19].

3.3.2.3. Reducción en los costes

Solamente el alquiler de la localización de una macrocelda en un escenario urbano, sin añadir costes de electricidad y canal de retorno, se estima alrededor de los 1000€ por mes. El despliegue de sistemas femtocelulares acabaría con la continua necesidad de instalar grandes antenas a lo largo de las ciudades, de modo que supondría una reducción a corto plazo en los costes de explotación de las operadoras. Estudios recientes [18] [20] muestran que el coste por año de una macrocelda asciende a los 50.000€ al año, mientras que el gasto de una femtocelda se sitúa en torno a los 200€ anuales. Desde el punto de vista del usuario también se producirá una bajada en su factura telefónica. El hecho de utilizar su propia red móvil dentro de su casa le permitirá disfrutar de tarifas más baratas para acceder a servicios de voz y datos, a la vez que mejora las prestaciones de éstos. Del mismo modo los estudios revelan que desde primeros de año el número de femtoceldas se ha incrementado hasta los 2,3 millones, y ya hay 31 operadores que están ofreciendo la tecnología como parte de su portfolio [19].

3.3.2.4. Instalación libre

En cuanto a la instalación de la femtocelda, cabe destacar que existe total libertad por parte del usuario para poder situarla en cualquier punto de su domicilio. Este hecho que aparentemente solo beneficia a los clientes, también supone una gran ventaja a los operadores [19]. A la hora de instalar una nueva macrocelda, no solo consiste en comprar la antena, instalarla y comenzar a ofrecer servicio de voz y datos en una determinada zona. Antes hay que realizar un estudio exhaustivo de la zona en donde se quiere instalar la macrocelda, de modo que se pueda conocer de antemano una estimación del número de usuarios que van a hacer uso de ella, la cantidad de tráfico de señalización que se va a producir (tráfico por el cual el operador no recibe dinero), encontrar un edificio donde instalar la antena en casos urbanos, diversos aspectos legales... Todo este proceso supone trabajo y costes para el operador. La utilización de femtoceldas no aspira a eliminar por completo la creación de nuevas antenas de gran tamaño, pero sí reducir la necesidad actual de instalar un mayor número de éstas [20].

3.3.2.5. Aumento del volumen de negocio

En el plano económico las femtoceldas abren una nueva fuente de ingresos en el sector de las telecomunicaciones. Por un lado los fabricantes de hardware acceden a un nuevo tipo de dispositivo, de modo que podrán crear una nueva gama de femtoceldas con diferentes parámetros y calidades [20]. Una vez comprobado el buen funcionamiento de estos sistemas, los operadores pueden lanzar paquetes promocionales para atraer usuarios, además de poder prestar servicios de voz y datos en zonas en las existía mala cobertura. Por último, las empresas dedicadas a la creación de software tienen la posibilidad de crear nuevas aplicaciones específicas para la nueva tecnología. En definitiva, la aparición de los sistemas femtocelulares supone un abanico de posibilidades para aumentar los ingresos, no solo de los operadores, sino también de las empresas de hardware y software [19].

3.3.2.6. Tecnología verde

Teniendo en cuenta los datos revelados en los estudios [23] y [24], el sector de las telecomunicaciones consume entre el 1% y el 3% de toda la energía consumida en el planeta y suponen una contribución similar en la emisión de gases invernadero. Las redes celulares típicas necesitan un gran número de estaciones base, en torno a diez mil, para ofrecer cobertura global a un país como España y se estima que cada una de estas antenas realiza un consumo eléctrico de 2,7 KW. Por otro lado, este despliegue era suficiente en el pasado para ofrecer cobertura en llamadas de voz y tráfico de baja velocidad, sin embargo resulta ineficiente aplicado a nuevos sistemas como UMTS, HSPA y LTE [19].

La aplicación de sistemas femtocelulares permite reducir el uso de grandes antenas derivando el tráfico que antes circulaba por éstas a través de pequeñas estaciones base de bajo coste eléctrico. De esta forma se lograría reducir el crecimiento del consumo eléctrico y la emisión de gases nocivos en los próximos años.

3.3.2.7. Nuevo mercado en expansión

El ya comentado aumento del volumen de negocio supone una oportunidad única para la creación de nuevas empresas y aplicaciones. Durante el *Mobile World Congress* de 2009 [18] [20], empresas como Airvana, picoChip u Orange ya presentaron numerosas aplicaciones y posibilidades derivadas del uso de femtoceldas. Las cuales fueron ampliadas en siguientes ediciones de este congreso, hasta que en la celebrada en Barcelona este mismo año la empresa KT presentó su nueva femtocelda con tecnología LTE

Al tener nuestra propia red móvil en casa se podrá acceder a servicios automáticos de mensajes alarmándonos de situaciones concretas. Por ejemplo en el caso de una familia con varios miembros, la femtocelda podrá mandar un mensaje de texto al terminal de los padres cuando su hijo entre en casa. Estas nuevas oportunidades se traducen en un aumento de la competitividad y de la posibilidad de crear nuevos negocios en torno a las femtoceldas. A pesar de los numerosos beneficios que supone la inserción de sistemas femtocelda dentro de la red dedicada a prestar servicios móviles, también existen una serie de desventajas propias de la inserción de una nueva tecnología en el mercado de las telecomunicaciones [19].

Llegado a este punto parece que las femtoceldas son la solución a todos los problemas de cobertura y estado de la red, pero entonces no se entiende porque las compañías retrasan su implantación. Esto es debido a dos factores principalmente, la seguridad y las interferencias [19] [22]. A continuación vamos a ver estos inconvenientes un poco más en detalle:

3.3.3. Interferencias en espacios femtocelulares

Como se ha explicado anteriormente las femtoceldas pueden beneficiar tanto al usuario como al operador. El usuario disfrutará de una mejor calidad de señal debido a la proximidad con la femtocelda, lo que le permitirá disfrutar de altas tasas de datos. Desde el punto de vista del operador, como el enlace *backhaul* se realiza a través de una conexión de banda ancha como puede ser una conexión de fibra óptica o ADSL, que el usuario se conecte a la femtocelda le supone un ahorro de recursos, los cuales puede asignar a otros usuarios, aumentando la capacidad de la macrocelda y mejorando la eficiencia espectral.

Las femtoceldas deben afrontar numerosas cuestiones antes de poder garantizar la interoperabilidad con las macroceldas existentes. A continuación se comentan varias de estas cuestiones, aunque principalmente se va a centrar en la gestión de recursos radio y en la gestión de la interferencia, ya que la interferencia entre femtoceldas vecinas y entre femtoceldas y macroceldas se considera uno de los principales retos de los despliegues femtocelulares.

En primer lugar hay que tener en cuenta el método de acceso, ya que las femtoceldas pueden configurarse de tres formas:

- Acceso abierto: Todos los usuarios pueden conectarse a la femtocelda.
- Acceso cerrado: Solo los abonados a la femtocelda pueden conectarse a ella.
- Acceso híbrido: Los usuarios no abonados solo pueden utilizar una determinada cantidad de los recursos de la femtocelda.

Algunas investigaciones [22] han mostrado que el acceso abierto mejora la capacidad global de la red, principalmente porque los usuarios de la macrocelda pueden conectarse a femtoceldas cercanas en zonas donde la cobertura de la macrocelda es deficiente. Desde el punto de vista de la interferencia, esto evita que las femtoceldas tengan usuarios interferentes en sus alrededores, ya que esos usuarios pueden conectarse a las femtoceldas. Como contrapartida, el acceso abierto aumenta el número de *handoffs* y señalización. Tampoco hay que olvidar que los abonados son los que pagan y mantienen las femtoceldas, por lo tanto, ellos no desearán que usuarios no abonados consuman parte de sus recursos, a menos que reciban algún tipo de beneficio o recompensa. Por lo tanto, este tipo de acceso es más interesante para lugares públicos, como aeropuertos, centros comerciales, etc. donde cualquier usuario puede beneficiarse de los servicios.

En cuanto a femtoceldas de acceso cerrado, parece que son más convenientes para despliegues en hogares. Sin embargo esto implica, que la potencia que atraviesa ventanas y puertas se convertirá en interferencia para los usuarios de las macroceldas que se encuentran en la zona, empeorando la calidad de su señal. Para tratar de solucionar estos problemas hay que emplear algoritmos de gestión de recursos.

El acceso híbrido permite la conexión de usuarios no abonados restringiendo la cantidad de recursos que son compartidos (OFDMA). De esta manera, se solucionan la mayor parte de los problemas de interferencia del acceso cerrado mientras controlamos el impacto sobre los propietarios de las femtoceldas.

Otro aspecto a tener en cuenta en las redes heterogéneas con femtoceldas es cómo vamos a gestionar la movilidad. En redes homogéneas con macroceldas el *handoff* celular se realiza cuando el usuario entra en la zona de cobertura de otra celda. Sin

embargo, en el caso de femtoceldas de acceso abierto o híbrido esto ocurre con más frecuencia, aumentando la señalización de la red. Se necesitan diferentes procedimientos de gestión de *handoffs* para permitir a los no abonados estar conectados durante periodos largos a femtoceldas cercanas evitando un aumento excesivo del número de *handoffs*.

Como las femtoceldas son instaladas por los usuarios, no es necesaria la existencia de un nodo central encargado de la gestión de sus recursos radio. Sin embargo, es necesaria una sincronización temporal en la red entre macroceldas y femtoceldas tanto para minimizar la interferencia como para que los *handovers* se desarrollen correctamente. Como uno de los objetivos de las femtoceldas es que sean de bajo coste, la fabricación de este tipo de estaciones equipadas con osciladores de gran precisión no es una cuestión trivial, así que es necesario considerar otras aproximaciones para lograr una sincronización temporal fiable.

Como una posible solución se ha propuesto en la literatura la utilización de receptores GPS, que proporcionan la hora con precisión. Sin embargo, su funcionamiento depende de la disponibilidad de cobertura GPS dentro de la casa o la oficina del usuario. Otra posible solución es el uso del protocolo PTP (*Precision Timing Protocol*) definido en el IEEE-1588, como un método para conseguir la sincronización. Sin embargo, son necesarias algunas modificaciones para llevar a cabo la sincronización de una forma eficiente sobre un enlace *backhaul* asimétrico como el ADSL.

El hecho de que las femtoceldas sean instaladas por los usuarios también implica que las femtoceldas tengan que operar bajo los principios de “*plug-and-play*”, es decir que las femtoceldas puedan organizarse y configurarse de manera autónoma y accedan al medio radio de manera inteligente para causar el menor impacto posible sobre el resto de redes. También hay que prestar especial atención a la seguridad, ya que las femtoceldas pueden ser vulnerables a ataques maliciosos (ataque de hombre en el medio, etc.). Por lo tanto es necesario implementar mecanismos de autenticación y de cifrado para garantizar la seguridad en las redes femtocelulares.

Para identificar una macrocelda, normalmente se emplea el PCI (*Physical Cell Identity*). Por ejemplo, los procedimientos de *handoff* se simplifican proporcionando la lista de los PCIs que el terminal móvil tiene que monitorizar. Este lista normalmente se conoce con el nombre de “lista de celdas vecinas” (*neighboring cell list*). No es necesario que el PCI de una celda sea único en toda la red, sin embargo debe ser único en una escala local, para evitar confusiones entre celdas vecinas. Este aspecto representa un reto en redes con femtoceldas, ya que deben seleccionar su PCI dinámicamente después de encenderse o de cambiar de posición para evitar colisiones con otras femtoceldas o con las macroceldas. Además, para situaciones con un despliegue extensivo de femtoceldas el reuso de PCIs entre femtoceldas de un mismo área es

inevitable, debido al limitado número de PCIs (en el caso de LTE, existen 504 PCIs), causando confusión entre PCIs duplicados.

El hecho de que las femtoceldas puedan encenderse o apagarse, o puedan cambiar de lugar hace que sus celdas vecinas varíen continuamente. Por lo tanto las femtoceldas deben ser capaces de variar su lista de celdas vecinas de una forma dinámica. Debido a esto, la relación entre femtoceldas debe manejarse de forma diferente que la relación entre femtoceldas y macroceldas. Además se espera, que el número de femtoceldas vecinas dentro de una macrocelda crezca por encima de las 32, que son el número de celdas vecinas que se consideran en las macroceldas. Por lo tanto, se deben desarrollar nuevas técnicas para permitir a las macroceldas y a las femtoceldas soportar un largo número de celdas vecinas y manejarlas rápidamente.

El aspecto clave en el que conviene centrarse es el análisis de interferencia, para ser capaces de encontrar estrategias de gestión de recursos radio que nos permitan minimizar la interferencia de la red, maximizando de esta forma el número de usuarios que puede soportar la red celular.

Hay que tener en cuenta que una femtocelda no solo proporciona cobertura dentro de la casa, sino que también radia hacia el exterior, introduciendo interferencia. Debido a esto y a que las femtoceldas se despliegan dentro de la cobertura de macroceldas ya existentes, pueden causar una fuerte degradación de las prestaciones de las macroceldas. Además, el despliegue de nuevas femtoceldas puede alterar el correcto funcionamiento de las femtoceldas ya existentes. En este tipo de despliegues se suelen considerar dos capas separadas (la capa de las femtoceldas y la de las macroceldas) dentro de la red, permitiendo clasificar las interferencias de la siguiente forma:

- Canal adyacente o *Cross-layer*: Se refiere a situaciones en las que el agresor (por ejemplo una macrocelda) y la víctima (por ejemplo un usuario de una femtocelda) de la interferencia pertenecen a diferentes capas de la red.
- Co-canal o *Co-layer*: En este caso el agresor (por ejemplo una femtocelda) y la víctima (por ejemplo un usuario de una femtocelda vecina) pertenecen a la misma capa de la red.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que debido a las características de los sistemas OFDMA, la interferencia solo ocurre cuando agresor y víctima utilizan los mismos subcanales de forma simultánea [4] [19]. Esto hace que sea necesaria una asignación eficiente de los recursos y un control de potencia adecuado para mitigar tanto la interferencia *co-layer* como la *cross-layer*. En las figuras 3.17 y 3.18 podemos observar los casos más comunes de interferencia en este tipo de redes heterogéneas, para el enlace descendente (DL) y ascendente (UL).

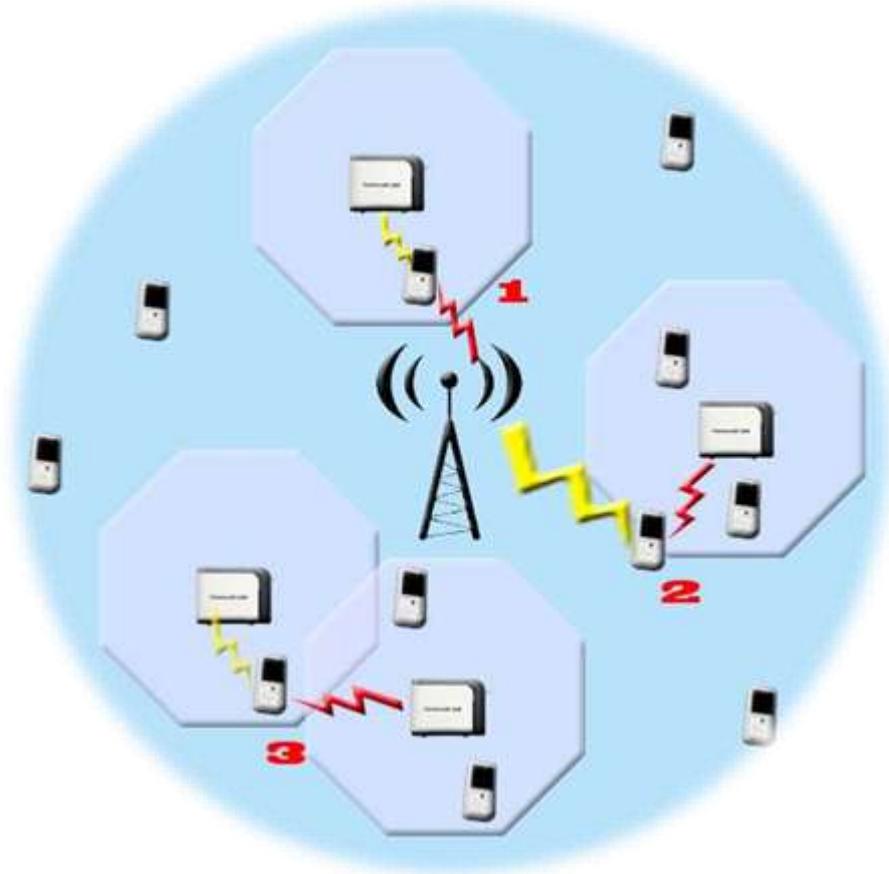


Figura 3.17. Escenarios de interferencia para el DL

El primer escenario a tener en cuenta es el caso 1 de la figura 3.17 en el que un usuario servido por una femtocelda se ve interferido por la macrocelda en la que está desplegada dicha femtocelda [4]. Aunque los usuarios estén bastante cerca de la femtocelda, como las femtoceldas transmiten con poca potencia, pueden ser interferidos por la macrocelda si no están muy alejados de la estación base. Para el caso 2 de la figura 3.17 un usuario servido por una macrocelda se ve interferido por una femtocelda cercana. En el caso de femtoceldas de acceso abierto o acceso híbrido esta situación puede evitarse, ya que el usuario podrá conectarse a esa femtocelda cercana y no será interferido. Sin embargo, para femtoceldas de acceso cerrado, si ese usuario no es un abonado será interferido por ella. Los dos escenarios anteriores hacen referencia a situaciones de interferencia cross-layer, mientras que el caso 3 de la figura 3.17 se trata de interferencia co-layer donde un usuario de una femtocelda se ve interferido por una femtocelda cercana.

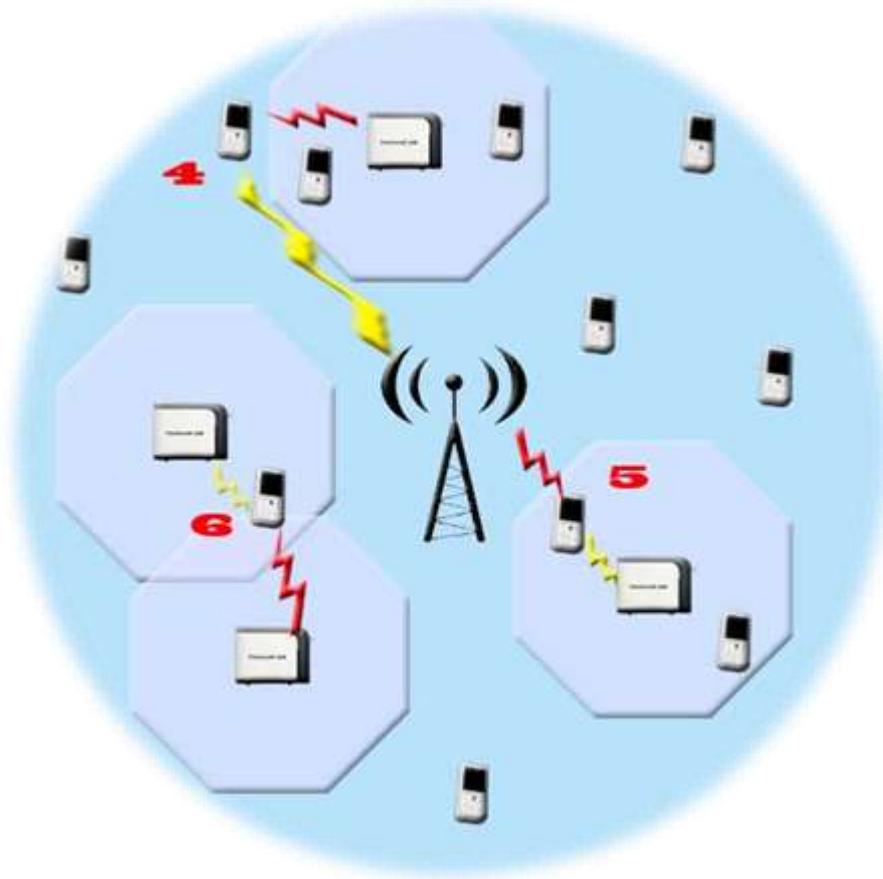


Figura 3.18: Escenarios de interferencia para el UL

En el enlace ascendente o *Uplink*, el primer escenario de interferencia que podemos considerar es el caso 4 mostrado en la figura 3.18, donde un usuario servido por la macrocelda interfiere a una femtocelda cercana, ya que los usuarios servidos por la femtocelda transmitirán con poca potencia al encontrarse cerca de ella, mientras que un usuario de la macrocelda que este lejos de la estación base transmitirá con bastante potencia, interfiriendo a las femtoceldas cercanas. Si las femtoceldas son de acceso abierto o híbrido esta situación podría evitarse, dejando que ese usuario se conectase a la femtocelda a la que interfiere. En el caso 5 de la figura 3.18 un usuario servido por una femtocelda interfiere a la macrocelda. Si la femtocelda está desplegada cerca de la macrocelda, sus usuarios pueden llegar a interferirla aunque transmitan con poca potencia. Estos dos escenarios muestran situaciones de interferencia *cross-layer*, mientras que el caso 6 de la figura 3.18 muestra una situación de interferencia *co-layer*, donde un usuario de una femtocelda interfiere sobre una femtocelda cercana [4][25].

Para evitar todas estas posibles situaciones de interferencia hay que realizar una gestión de recursos adecuada, para tratar de mitigar tanto la interferencia por canal adyacente como la de co-canal. Además, las técnicas convencionales de gestión de

recursos radio para sistemas macrocelulares no son válidas para despliegues femtocelulares ya que la posición de las femtoceldas es desconocida, depende de donde la despliegue el usuario final.

Como se ha podido ver aún quedan muchas cuestiones abiertas que solucionar para que los despliegues de femtoceldas sean realizables y tengan un comportamiento adecuado, sin perturbar en exceso el funcionamiento de los sistemas celulares sobre los que se despliegan y de esto va a tratar el proyecto.

3.3.4. Aspectos técnicos de las Femtoceldas

La principal ventaja de los sistemas femtocelda frente a las macroceldas consiste en un aumento en la calidad de los servicios ofrecidos por los operadores. La capacidad del enlace inalámbrico depende de la relación señal a interferencia más ruido (SINR) del enlace que a su vez depende de multitud de características del enlace como la potencia emitida por el transmisor, la cantidad de potencia interferente, el nivel de ruido, pérdidas por propagación o la existencia de desvanecimiento de la señal. Por lo tanto, el modo de alcanzar tasas binarias elevadas es maximizando estos parámetros, lo que en definitiva se atribuye a las siguientes características:

- Reducir la distancia entre estación base y usuario, de modo que la potencia recibida, por el terminal sea mayor que en el caso macrocelda.
- Baja potencia de transmisión lo que hace que la interferencia sobre la red macrocelda sea baja. Además, debido a las pérdidas por propagación en el exterior y por penetración, la interferencia proveniente de las macroceldas se reduce.
- Servicio para un número reducido de usuarios. Al ser compartidos los recursos (ancho de banda y potencia de transmisión) entre pocos usuarios, se podrá proporcionar una calidad de servicio alta a diferencia de las macroceldas que tienen que cubrir zonas extensas con muchos usuarios.

Las dos primeras características suponen una mejora en la capacidad debido a un aumento en la relación SINR, mientras que la tercera supone un aumento en el uso del ancho de banda y de la potencia disponible por el transmisor. Cabe destacar que en este proceso hemos tenido en cuenta la suposición de que la calidad del canal de retorno ADSL, es suficiente para dar servicio al punto de acceso femtocelda.

3.3.5. Infraestructura de la red

A lo largo del siguiente apartado vamos a realizar una breve descripción de la infraestructura de un sistema femtocelular. En la figura 3.19 encontramos el punto de acceso femtocelda en el centro de la vivienda, ofreciendo servicios de voz y datos a multitud de dispositivos. Este punto se encuentra conectado con el *router* encargado de ofrecer conectividad ADSL mediante el distribuidor contratado el usuario[4] [26]. Una vez dentro de la red IP, ésta se encuentra conectada con la capa macrocelda del operador móvil, de modo que sea esta red la encargada de gestionar la propia red femtocelda.



Figura 3.19. Esquema de una red femtocelular

En la siguiente representación, figura 3.20, se observa el detalle del despliegue de un punto de acceso a través de la conexión DSL. La femtocelda se encarga de prestar servicio 3G a los terminales móviles, mientras que la conexión DSL permite que el ordenador personal del usuario haga uso de la red Wi-Fi, y el teléfono fijo mediante voz sobre IP.

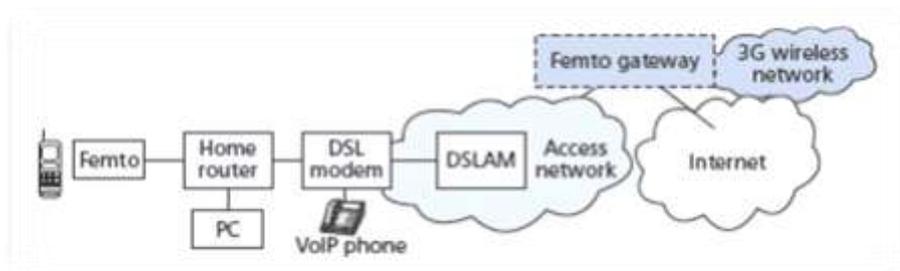


Figura 3.20: Despliegue de una femtocelda a través de ADSL

3.3.5.1. Arquitectura y Terminología

Desde el punto de vista de la arquitectura, una femtocelda es una extensión de la infraestructura de la red móvil, y puede considerarse dentro del paradigma formado por ésta. Sin embargo, también hace uso de la red IP, de modo que es necesaria una buena calidad en este tipo de servicio [4]. En este sentido, existe la posibilidad de que el suministrador de DSL sea distinto al contratado en nuestros dispositivos móviles, por ejemplo, servicios UMTS contratados con Vodafone y DSL con Ono. En este tipo de situación, se espera que los operadores móviles no necesiten un acuerdo previo para operar en la red del proveedor de DSL. Llegados a este punto, es necesario destacar que el análisis del impacto de las femtoceldas en la red IP, y el uso que realizan de ésta, no es uno de los objetivos del proyecto. Antes de comenzar con los distintos aspectos propuestos por el 3GPP, vamos a realizar un breve resumen de la terminología utilizada por dicho organismo [26].

- HNB “*Home Node B*”: Genéricamente el 3GPP habla de HNB a la hora de referirse al punto de acceso femtocelda. El equipo local del usuario se comporta como un nodo a través de la interfaz Uu (interfaz aérea) y se conecta a la red móvil a través de la red IP mediante la interfaz Iuh. El encargado de este traspaso es el HNB.
- HNB-GW “*Home NodeB Gateway*”: Nos referimos a HNB-GW como la interfaz de punto de acceso femtocelda. Es el encargado de concentrar un número grande de HNBs en una interfaz IuCS/PS para introducir la información en el núcleo central de la red IP.
- HMS “*Home Node B Management System*”: Es el elemento encargado de gestionar los recursos de los HNBs.

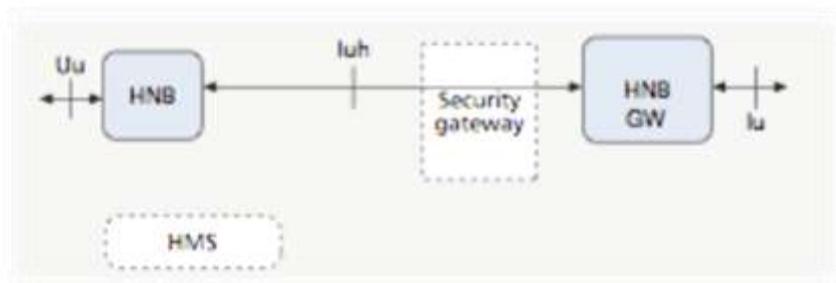


Figura 3.21: Arquitectura de acceso a red de un HNB

En la figura anterior, la 3.21, podemos observar la arquitectura del acceso a la red a partir de un HNB, éste se conecta a la red IP a través del HNB-GW que actúa como concentrador para agregar un gran número de HNBs, esta interfaz es conocida como Iuh. Además, este esquema aporta seguridad mediante el SeGW “*Security Gateway*”, 3GPP especifica IPsec en modo túnel como mecanismo de seguridad. La conexión entre el HNB-GW y el núcleo de la red se realiza mediante la interfaz

IuCS/IuPS, este hecho implica que aunque existan múltiples HNBs la información se concentrará en una sola interfaz a través del HNB-GW, satisfaciendo el requerimiento del 3GPP y de muchos operadores, los cuales no consideran realizar cambios en los sistemas del núcleo central de la red IP debido a la aparición de las femtoceldas. Respecto a la interfaz de radio entre el HNB y los terminales femtocelda, salvo por alguna pequeña modificación como la inclusión de los grupos cerrados de suscriptores, se mantienen los estándares actuales. En la siguiente figura, la 3.22., mostramos las capas de protocolos de la interfaz Iuh, entre el HNB, SeGW y HNB-GW [4].

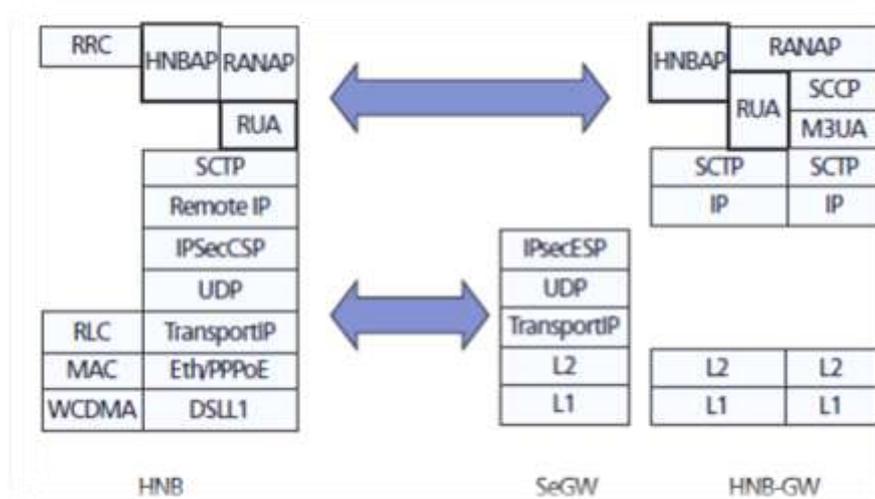


Figura 3.22: Capa de protocolos de la interfaz Iuh

Hay que destacar la aparición de dos nuevos protocolos:

- *HNB Application Protocol (HNBAP)*: Se trata de un protocolo que proporciona un control específico para el despliegue de las femtoceldas dentro de la red de operadores.
- *RANAP User Adaptation (RUA)*: Se trata de una pequeña adaptación que permite a RANAP transportar mensajes e información de señalización directamente a través del SCTP “*Stream Control Transport Protocol*” antes de pasar por la interfaz Iu, la cual utiliza unos protocolos más complejos y pesados, y por tanto, menos adecuados para el uso de femtoceldas, ya que operan desde el servicio DSL contratado por el usuario.

3.3.6. Estandarización por el 3GPP

La tecnología basada en femtoceldas comenzó a despertar curiosidad a finales de 2007 y principios de 2008, y se presentaba como la solución para explotar todas las

posibilidades que ofrecen los sistemas UMTS y 3G. Como cualquier otra nueva tecnología que va a ser lanzada al mercado, es necesario un proceso de estandarización para conseguir una economía de escala y sobre todo la aceptación de los fabricantes y consumidores.

3GPP está realizando un gran esfuerzo para definir una serie de estándares en los aspectos esenciales de los sistemas UMTS/UTRAN basados en femtoceldas. El compromiso entre operadores y vendedores se encuentra reflejado en el UMTS *Release* 8, que proporciona las ideas básicas para la comercialización de los sistemas femtocelda 3G, y la implantación de éstos dentro del núcleo de la red de servicios móviles.

Technology	Specification	Title	Release
W-CDMA	25.101	User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)	R99
			R4
			R5
			R6
W-CDMA	25.102	User Equipment (UE) radio transmission and reception (TDD)	R99
			R4
			R5
			R6
3G	22.220	Service requirements for Home NodeBs and Home eNodeBs	R8
	25.469	UTRAN Iuh interface Home Node B (HNB) Application Part (HNBAP) signalling	R8
	25.820	3G Home NodeB Study Item Technical Report	R8
	25.967	FDD Home NodeB RF Requirements	R8

Figura 3.23: Especificaciones del 3GPP sobre UTRA

3.3.7. El futuro de las femtoceldas

El incremento del uso de servicios de datos a través de la red móvil ha hecho que los operadores aumenten su interés por el uso de las femtoceldas como una posible solución a lo que se viene denominando *data offload*.

El concepto de *data offload* es muy simple. En una red celular tradicional todo el tráfico que va desde y hacia los dispositivos móviles viaja hasta la estación base que suele estar a cientos de metros o incluso kilómetros con los problemas que esto conlleva. *Offload* significa que otros dispositivos como pueden ser las femtoceldas o el router Wi-Fi encaminen el tráfico del teléfono móvil a través de otra red alternativa (típicamente ADSL o conexión por fibra óptica) hasta el operador y/u otro destino de Internet. Aunque se suele hablar de *data offload*, el concepto también es aplicable al tráfico de voz. *Data offload* es por tanto, uno de los beneficios de las femtoceldas.

El crecimiento del uso de servicios de datos viene dado por la alta penetración de los dispositivos Smartphone y del aumento del uso por dispositivo. El efecto es que el total del uso de datos está incrementándose en más de un 108% por año según una estimación de CISCO SYSTEMS [27] como se muestra a continuación

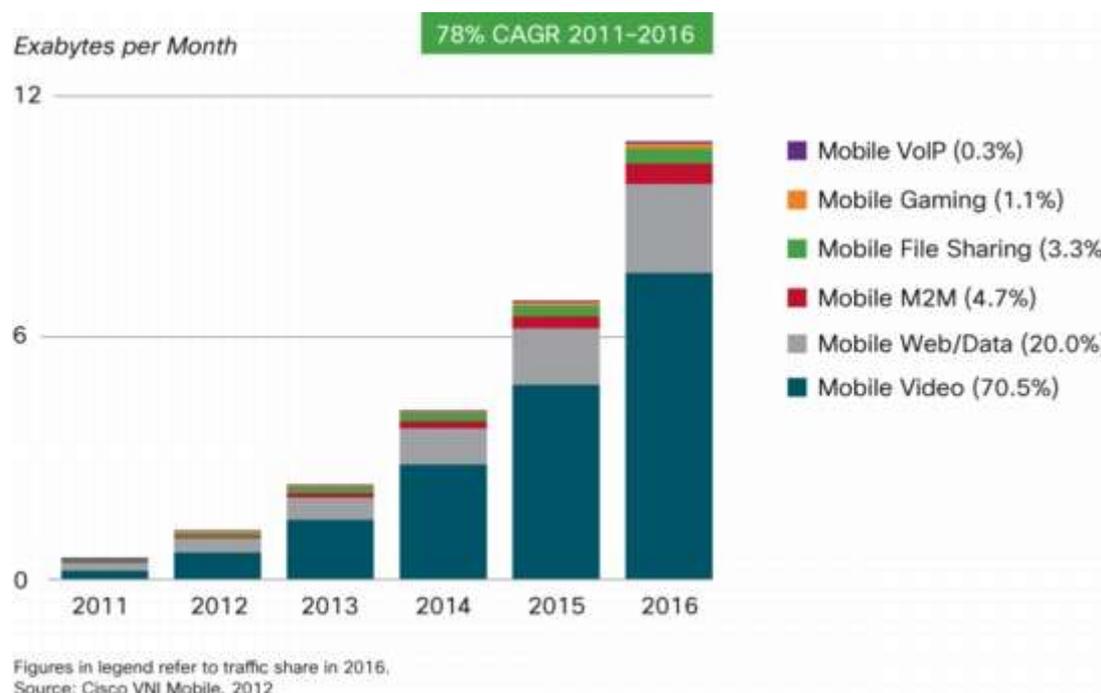


Figura 3.24. Uso global de servicios de datos inalámbricos (Exabytes por mes)

El futuro de las telecomunicaciones móviles y la utilización de las femtoceldas en éstas, han sido uno de los principales temas de debate del *Mobile World Congress* de 2012 celebrado en Barcelona.

Con el paso del tiempo hemos pasado de tener una única línea fija pagando cantidades variables en función del tiempo de servicio, a estar conectados con familiares, amigos y empleados de una forma móvil, dinámica y por un precio fijo al mes. Las comunicaciones móviles son cada vez más avanzadas permitiendo acceder a Internet, descarga de datos, video en tiempo real, etc. Sin embargo, poca gente utiliza este tipo de servicio en su domicilio debido a la mala calidad de éstos en comparación con un ordenador personal. Se podría decir que hoy en día las posibilidades que ofrecen los nuevos terminales están por encima de la calidad de servicio ofrecida por los operadores.

Según un estudio realizado por Orange [18], entre el 12% y el 22% de sus usuarios tiene problemas de cobertura dentro de su domicilio, y entre el 5% y el 8% han decidido cambiar de compañía alegando este tipo de problema. Finalmente, casi la mitad de los usuarios estarían interesados en una solución que fuese capaz de eliminar este tipo de contratiempo, especialmente los usuarios de servicios 3G.

Según un estudio realizado por Informa [21] sobre el uso que se hace de los dispositivos móviles en interiores, se espera que para este año el 55% del uso de servicios de datos se haga dentro de casa y el 26% en la oficina. La proporción que se hará en otros lugares (fuera de casas/oficinas o en movimiento) será el otro 19%. Si cada consumidor tuviera una femtocelda en su casa u oficina una gran porción (81%) del total de su tráfico desaparecería de la red ofrecida por la macrocelda.

Respecto a la repercusión de las femtoceldas en un futuro próximo, [27] se estima que en este 2012 habrá instalados un total de 70 millones de unidades de este tipo de dispositivos en todo el mundo. En definitiva se puede decir que se trata de una tecnología que pronto dará el gran salto al mercado de las telecomunicaciones, de hecho, empresas como Vodafone, T-Mobile y O2 han anunciado próximos despliegues femtocelulares. Especialmente llamativo resulta el movimiento comercial de Google, que adquirió un gran número de acciones de la empresa Ubiquisys, la cual ha realizado una apuesta firme por las femtoceldas.

Además destacar que las femtoceldas abren la posibilidad de dos tipos de servicios distintos, por un lado los ofrecidos por el operador, tales como Internet, llamadas, mensajes, etc. y por otro lado servicios orientados a la domótica, es decir, la femtocelda podrá interactuar con la televisión, el ordenador personal, la cocina, etc. También esta tecnología se perfila como la solución a los problemas derivados de 3G, las empresas apuestan por ella como unos de los pilares de apoyo de la red LTE y los servicios de cuarta generación, ya que en estos casos los usuarios necesitarán mucha más velocidad de transmisión que la ofrecida actualmente y mejor cobertura en escenarios interiores.

A día de hoy podemos decir que las femtoceldas ya tienen un presente. El 1 de julio de 2010 Vodafone lanzó en Reino Unido la primera comercialización de tecnología femtocelular con el nombre de “*Vodafone Access Gateway*”, siendo la primera operadora en hacerlo en Europa. Aunque en España no lleguen los avances tecnológicos a la vez que en el resto del mundo, las 3 principales operadoras del país prevén comenzar el despliegue de esta tecnología este mismo año debido en gran parte al espectacular aumento de ventas de terminales Smartphone. Como se puede observar en el gráfico de la figura 3.25 en octubre de 2011 España era el mayor consumidor Europeo de este tipo de terminales y a día de hoy esa cifra ha aumentado en casi un 16%.

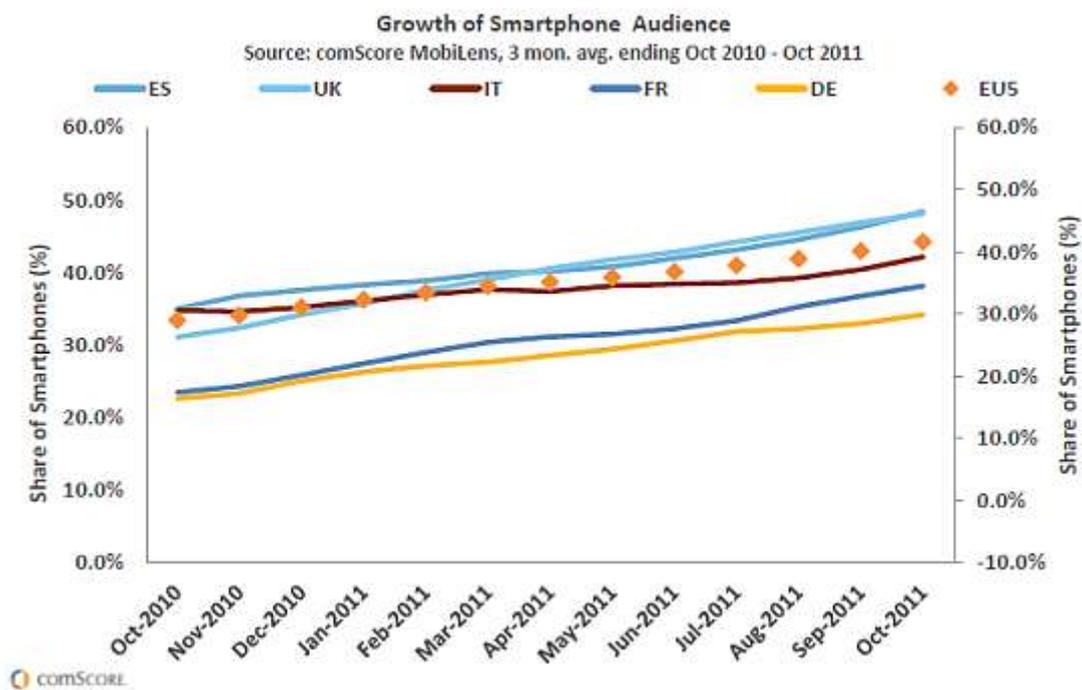


Figura: 3.25 Crecimiento del número de Smartphone en Europa

CAPÍTULO IV

Resultados

4.1 Acercamiento al problema

Este proyecto se basa en el estudio del comportamiento de un sistema femtocelular en un entorno interior. Para ello se utilizarán varios métodos de análisis para comprobar el correcto funcionamiento de estos.

La primera parte del proyecto consistirá en acercarse a estos métodos, tanto a los empíricos con el consiguiente análisis de las fórmulas, como al método determinista con la simulación de escenarios mediante el código de Ray Launching. De esta forma se podrá decidir, o al menos empezar a vislumbrar cuál de ellos es más recomendable para realizar este tipo de estudios.

4.1.1 Resultados escenario 1: Jerónimo de Ayanz

Para empezar con el proyecto se eligió el laboratorio del edificio Jerónimo de Ayanz. Esta elección se hace desde la base de que hay una serie de medidas reales con las que poder contrastar los datos de las simulaciones. Del mismo modo se consideró un escenario suficientemente complejo para simularlo y que brinda la oportunidad de hacer diferentes pruebas con él.

El escenario a simular es el que aparece en la siguiente figura:

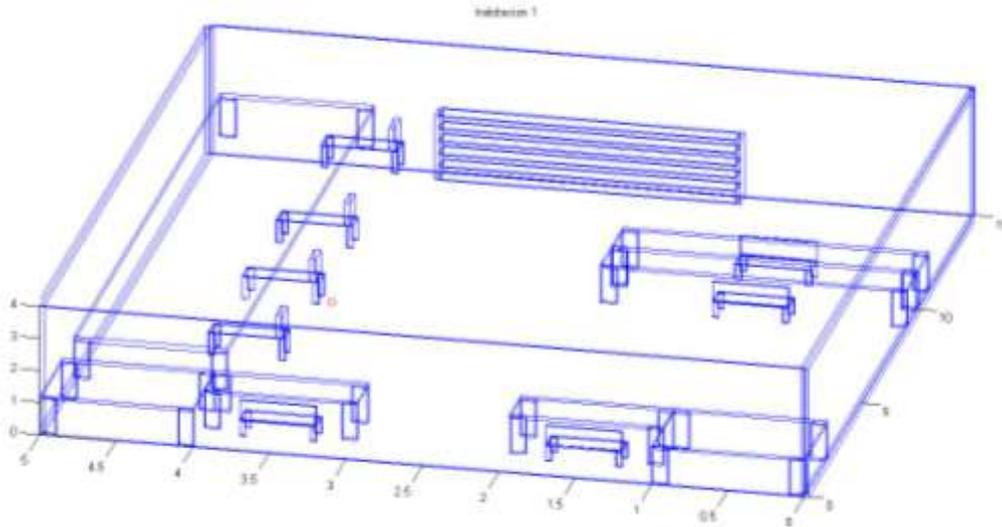


Figura 4.1: Laboratorio JDA en la primera prueba

Originalmente se probó una posición aleatoria de la antena ya que no importa mucho la ubicación para nuestro primer objetivo, el cual consistía en aprender el uso del código y encontrar una resolución óptima.

Como estaba previsto estos datos resultaron insuficientes para el estudio de la sala ya que se había utilizado una resolución de cubos de 33 cm^3 . Este tamaño resultaba excesivo por lo que para siguientes pruebas se varió.

La antena es una antena omnidireccional colocada en la posición $X=3.75$ e $Y=7.5$ m, y a una altura de 1.2m. Los datos obtenidos se muestran a continuación:

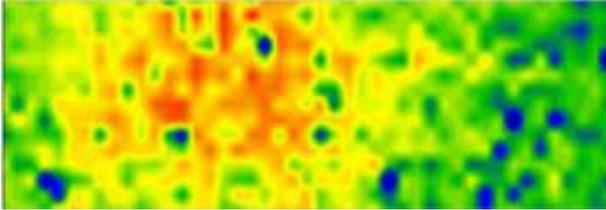
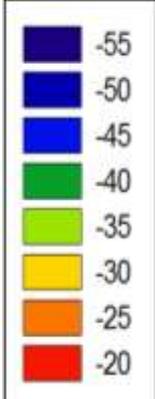
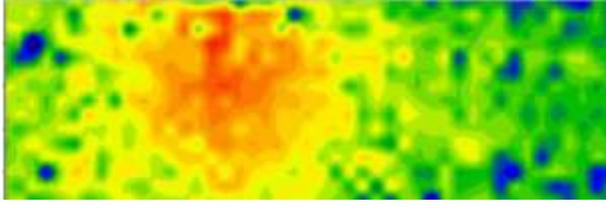
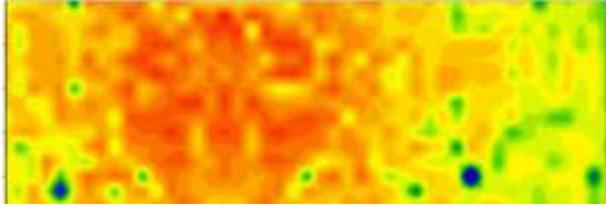
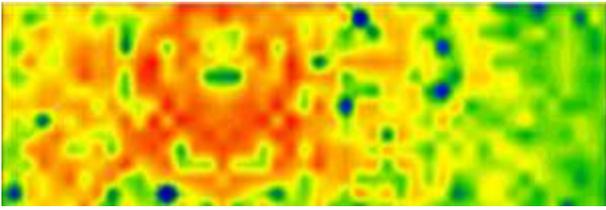
	Potencia recibida (dBm)	Escala (dBm)
		 <ul style="list-style-type: none"> -55 -50 -45 -40 -35 -30 -25 -20
Corte a 1.2 m (antena)		
Corte a 2.5 m		
Corte a 4m (techo)		

Tabla 4.1: Resultados primera prueba con el Ray Launching

En estas figuras se puede observar como entre el suelo y la altura de la antena se dificulta la transmisión de la onda. Esto es debido a la concentración de mobiliario en esta zona. Conforme aumentamos de altura y desaparecen los obstáculos para la propagación de la onda, se puede ver que alcanza mejores valores y por lo tanto la calidad de la señal será mejor. Como se aprecia, esta prueba no nos aporta mucho, así que queda descartada para seguir trabajando con ella.

Siguiendo con el mismo escenario se pretende comprender el efecto de la propagación multitrayecto y para tal fin se aumentará la resolución de la simulación, hasta obtener cuboides de 10 cm, y la antena, también omnidireccional se situará esta vez en el centro de la sala. Las coordenadas de la antena son:

- Eje X = 2.5 m
- Eje Y = 7.5m
- Eje Z = 1.5m

Como los sistemas femtocelulares funcionan a diferentes frecuencias, con este escenario se van a realizar varias simulaciones con cada una de estas frecuencias. Las frecuencias utilizadas van a ser: 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2500 MHz y 2600 MHz. Para no saturar este apartado de figuras y gráficas solo se presentarán los resultados más representativos en los que se pueda observar cierta diferencia, los elegidos son 900 MHz y 2500 MHz.

Estos datos se van a presentar en las tablas 4.2 y 4.3.

El resto de datos se incluirán en el Anexo 3

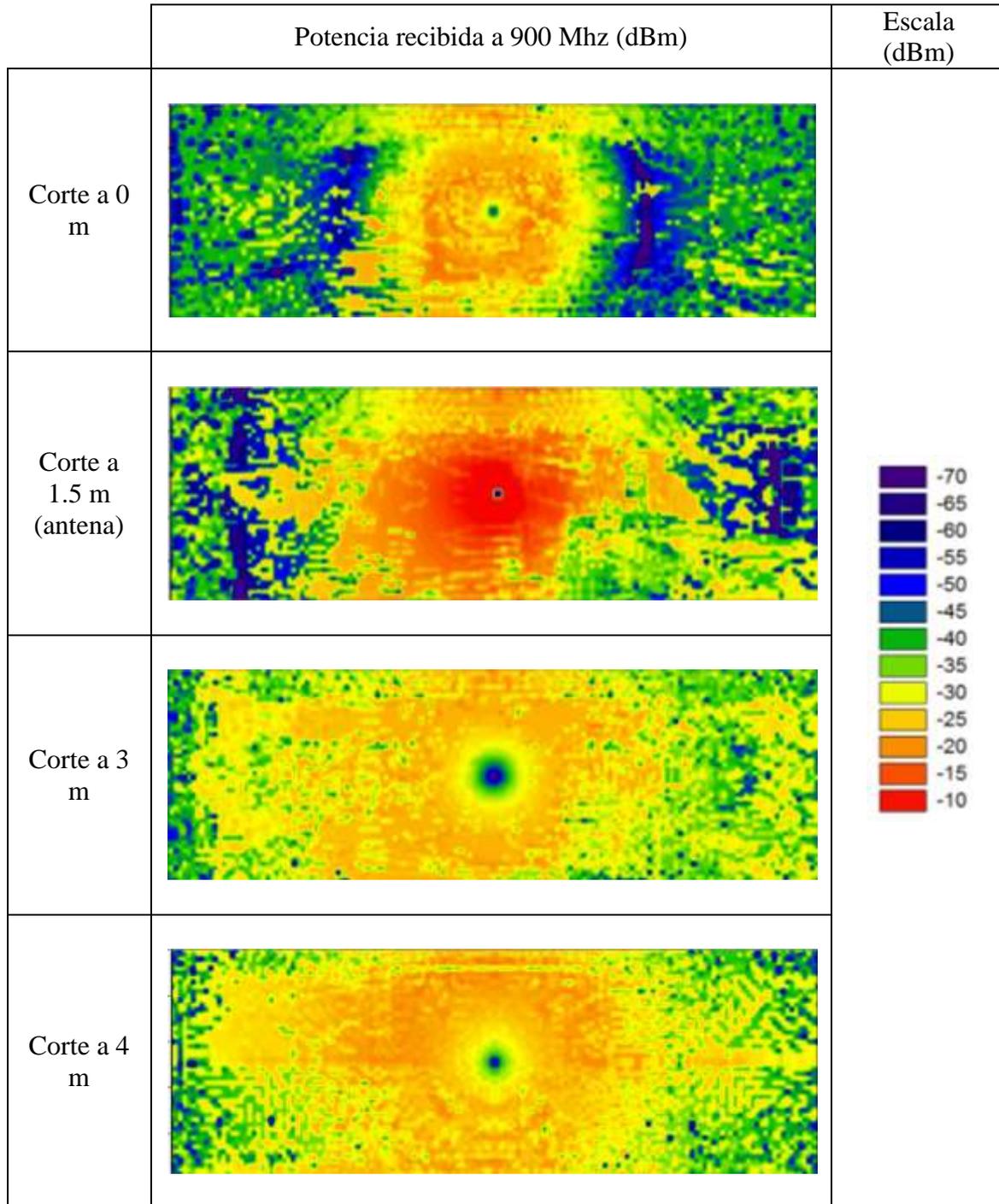


Tabla 4.2: Potencia recibida a 900 MHz

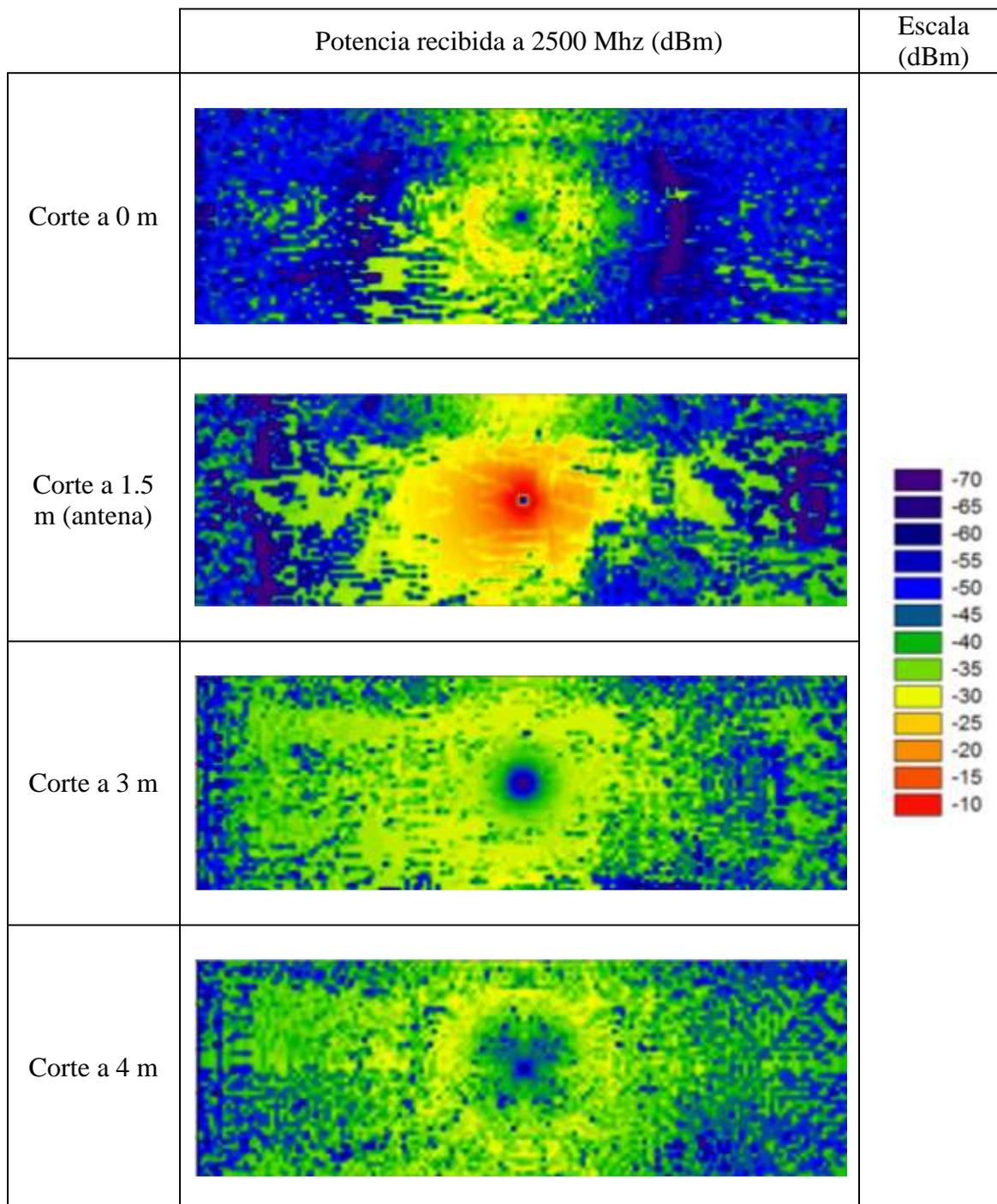
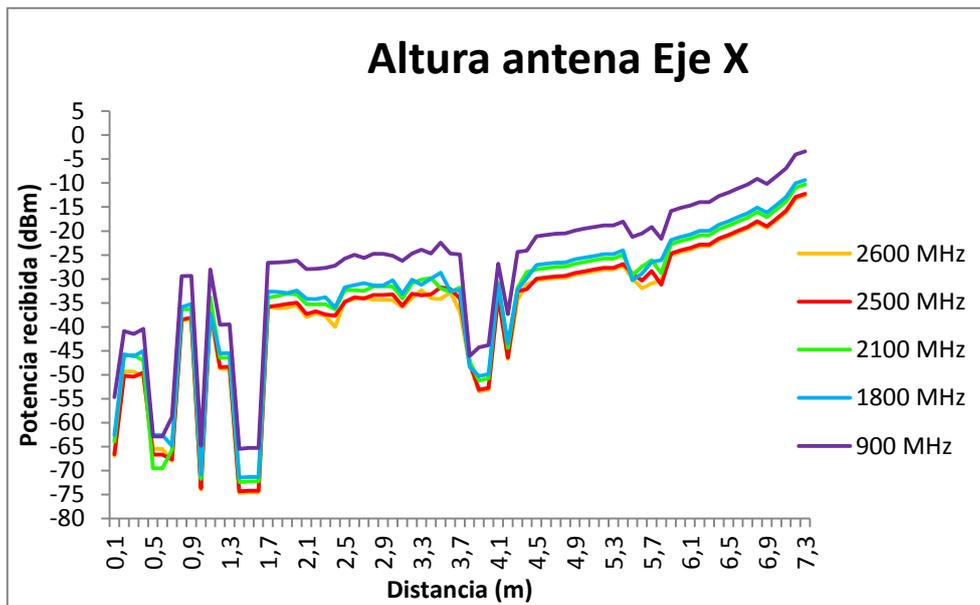


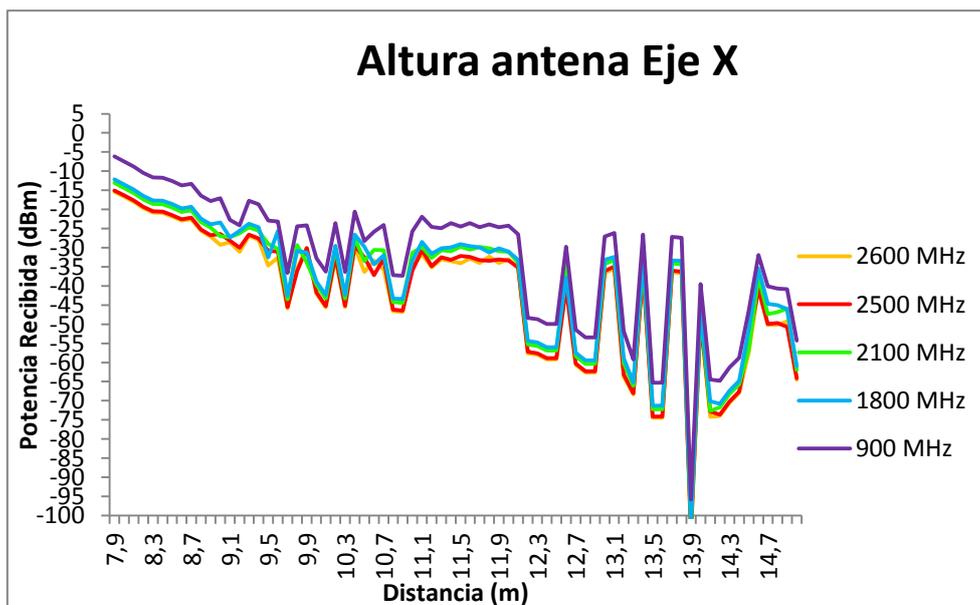
Tabla 4.3: Potencia recibida a 2500 MHz

Tras observar estas dos figuras de resultados queda claro que la frecuencia de emisión influye mucho en la potencia recibida en cada punto, a mayor frecuencia, menos potencia. A través de estas imágenes es muy difícil cuantificar estos datos, por lo que se van a mostrar en una serie de gráficas explicativas.

La primera muestra a la altura de la antena, un corte a lo largo de la habitación. La gráfica ha sido dividida en dos partes para poder evitar, de este modo, el error producido, en un pequeño radio alrededor de ésta, por el simulador.



Gráfica 4.1: Radiales comparativas a la altura de la antenna (A)



Gráfica 4.2: Radiales comparativas a la altura de la antenna (B)

4.1.2. Preparación del APS

Con el fin de mostrar el efecto de las componentes multitrayecto que afectan a la propagación de ondas, se ha preparado un informe en el que se intente dejar claro y de forma visual este efecto. Para ello se va a utilizar esta misma configuración de la sala, con la antena en el centro.

Para tal fin se han elegido cuatro radiales de la sala, o lo que es lo mismo, cortes de ella: dos en el plano X y dos en el plano Y.

Con la siguiente figura quedará más clara esta distribución:

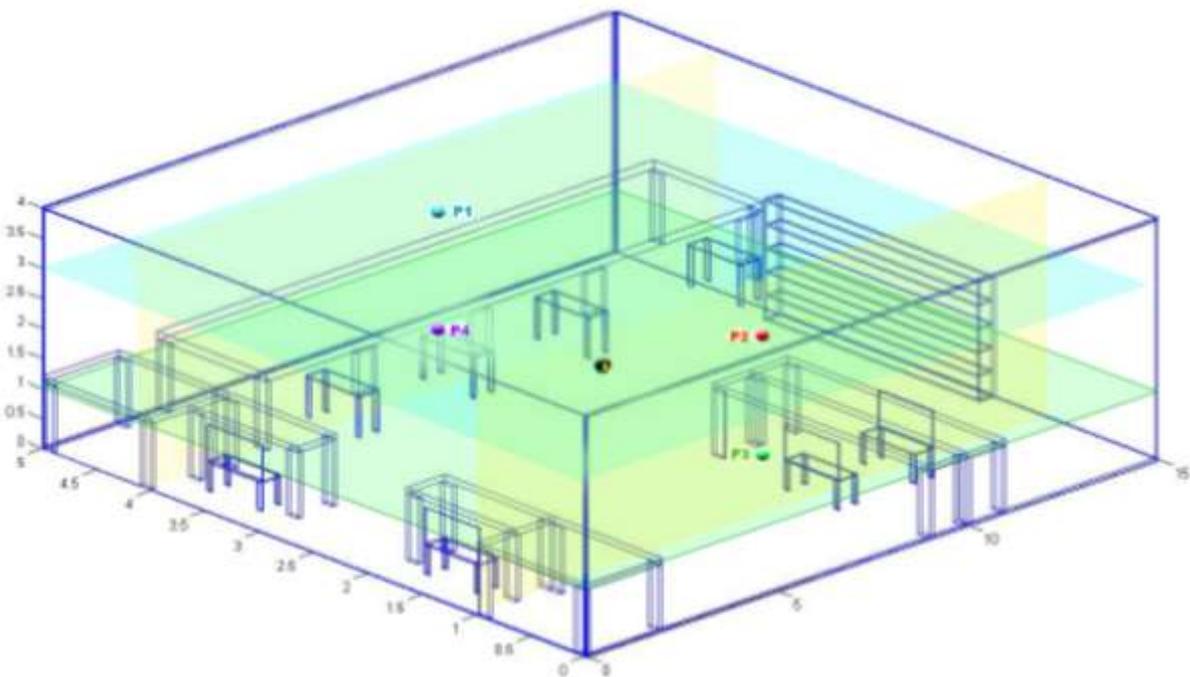
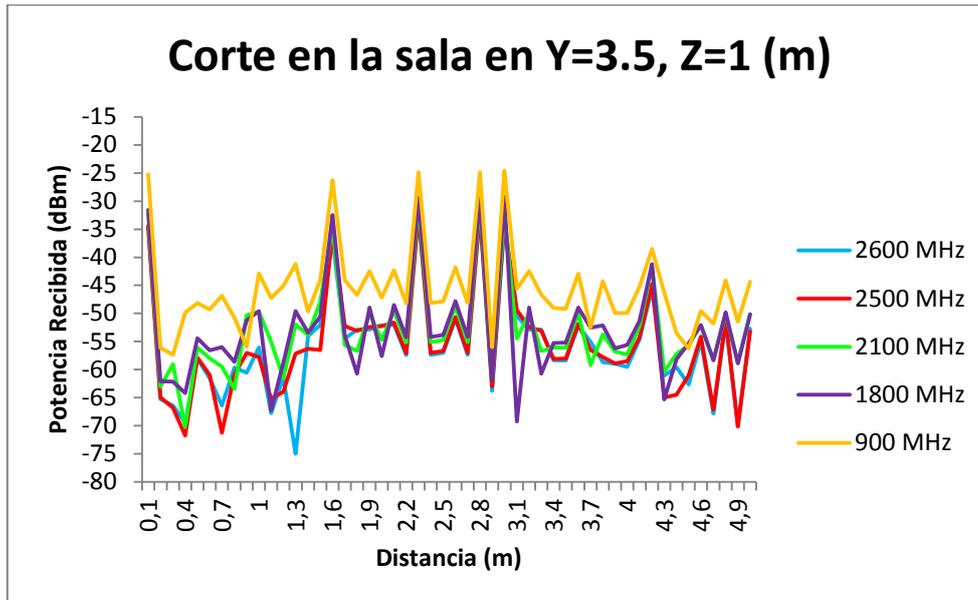


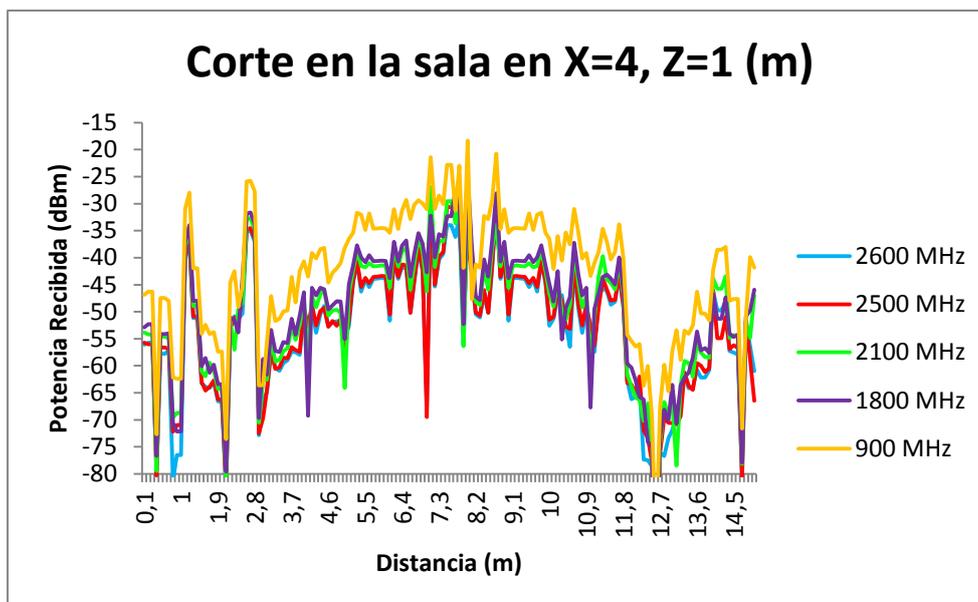
Figura 4.2: Radiales y puntos de estudios para la APS

- La radial 10 del eje X equivaldría a un corte a 1 metro en el eje X
- La radial 40 del eje X equivaldría a un corte a 4 metros en el eje X
- La radial 35 del eje Y equivaldría a un corte a 3'5 metros en el eje Y
- La radial 115 del eje Y equivaldría a un corte a 11'5 metros en el eje Y

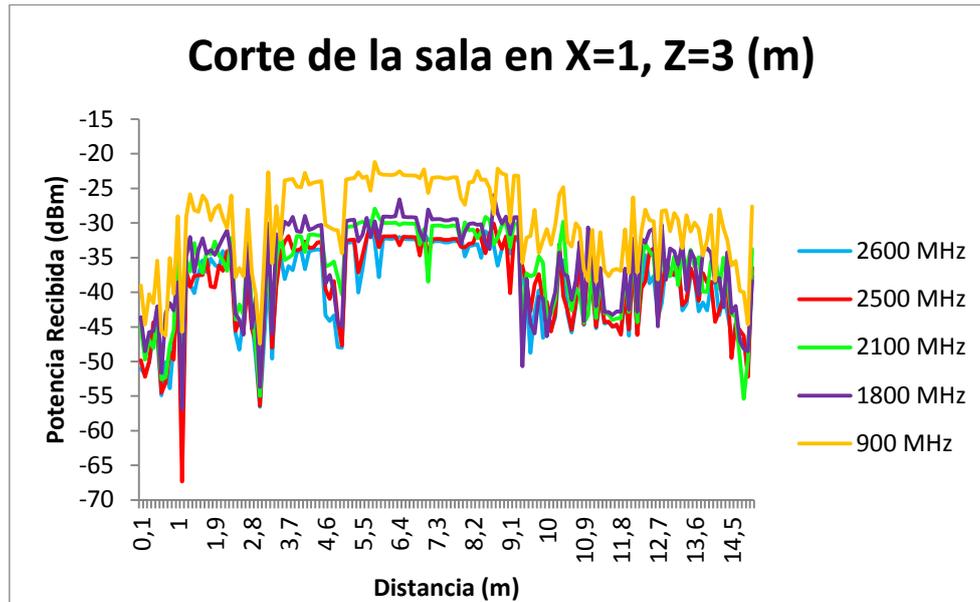
Aunque aquí no se muestren todas, se van a sacar gráficas comparativas para varias frecuencias de todos estos cortes y para dos alturas diferentes, a 1 metro y a 3 metros. De esta forma se podrá caracterizar de forma muy cercana a la realidad la propagación de ondas en este escenario.



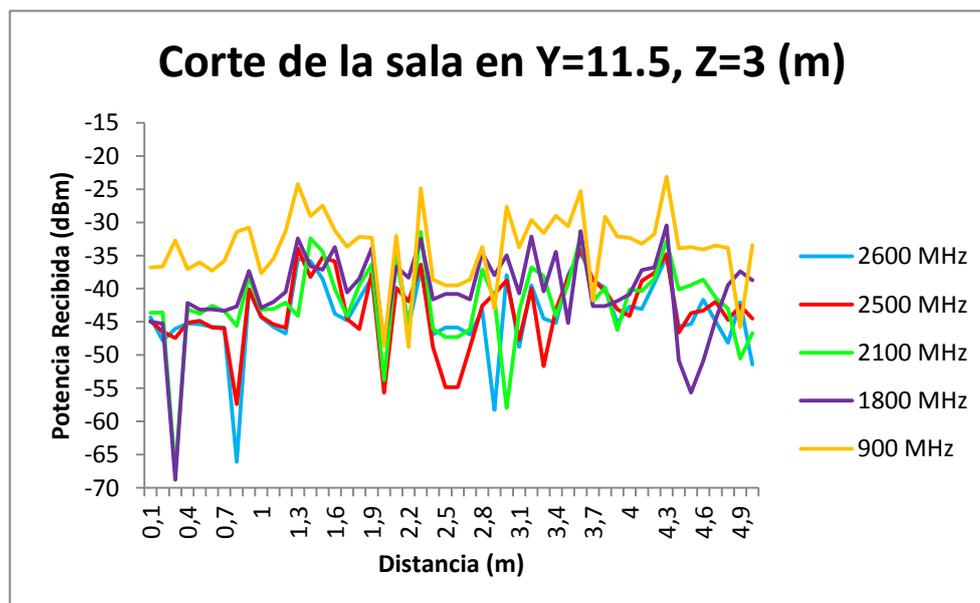
Gráfica 4.3: Potencia recibida en el corte Y=3.5m a un metro de altura



Gráfica 4.4: Potencia recibida en el corte X= 4m a un metro de altura



Gráfica 4.5: Potencia recibida en el corte X=1m a tres metros de altura

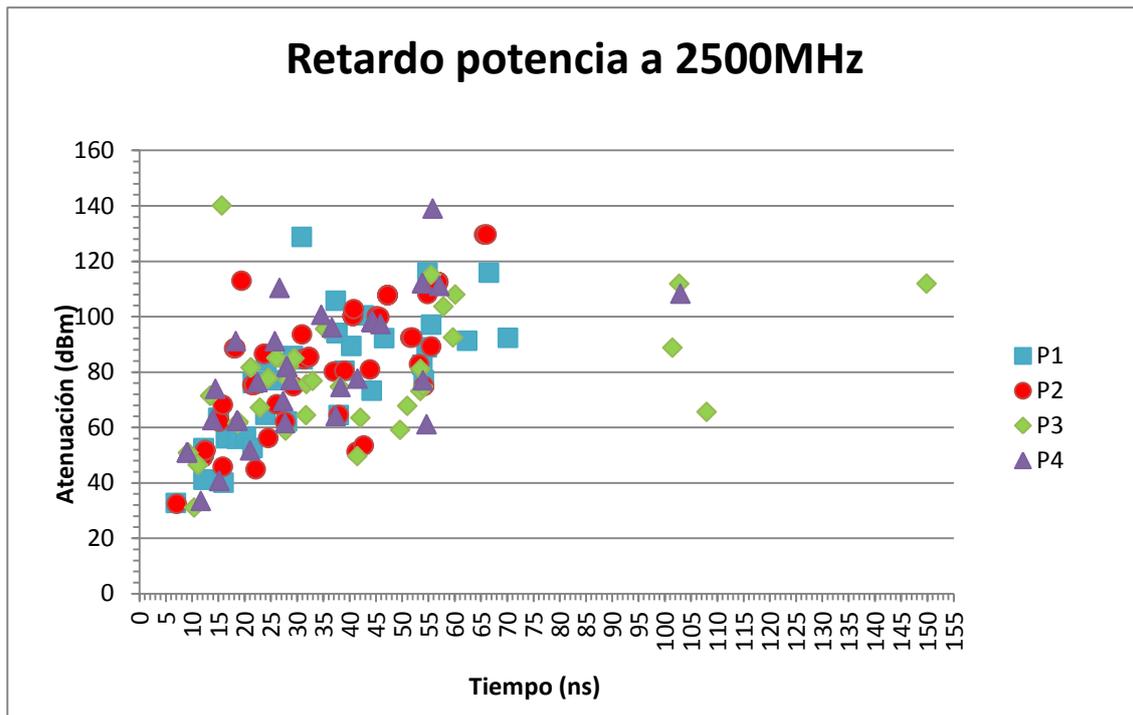


Gráfica 4.6: Potencia recibida en el corte Y=11.5 a tres metros de altura

Estas gráficas son muy diferentes entre sí, lo que quiere decir que no en todos los puntos llegan la misma cantidad de rayos ni con la misma potencia. Por lo tanto se podría asegurar que la existencia de componentes multitrayecto hace de los métodos deterministas de simulación de la radiopropagación mucho más eficaces que los métodos matemáticos, los cuales no tienen en cuenta esta característica.

Para asegurar aún más esto, se han localizado en el plano cuatro puntos para calcular su retardo-potencia. Esto es, cuánta potencia llega a ese punto y en qué instante. Los cuatro puntos elegidos se pueden ver en la gráfica 4.7. y están localizados en:

- Punto 1 (P1): X=4, Y=7.5, Z=3 metros
- Punto 2 (P2): X=1, Y=7.5, Z=3 metros
- Punto 3 (P3): X=1, Y=7.5, Z=1 metros
- Punto 4 (P4): X=4, Y=7.5, Z=1 metros



Gráfica 4.7: Retardo potencia a 2500 MHz

En esta gráfica se ve exactamente lo que se estaba buscando: la componente multitrayecto de la radiopropagación. Se puede apreciar cómo no todos los rayos llegan a la vez, con diferencias de hasta 150 nanosegundos. También queda claro que no llegan el mismo número de rayos a todos los puntos. Se ha elegido la frecuencia de 2500MHz, de forma aleatoria, ya que la única diferencia entre esta frecuencia y las demás son los niveles de potencia que llegan a estos puntos, dado que llegan en el mismo instante de tiempo.

4.1.3. Resultados del escenario 1: Fuente encima de una estantería

Para comprobar cómo varía la distribución de potencia dependiendo de la posición de la fuente, se procederá a colocarla en otro punto. Este punto será encima de la estantería del fondo de la sala, por lo que no estará muy lejos de la primera fuente. Pese a esto, observaremos que esta pequeña variación dará lugar a una distribución de potencia sustancialmente diferente.

Los cortes empiezan a ras de suelo, es decir, el corte uno es el comprendido desde 0 hasta 10 cm. Del mismo modo el último corte (40) estará comprendido entre los 3'90 y los 4 metros de altura.

Para esta prueba la antena estará colocada a 15 cm de la pared del fondo y a 5 sobre la estantería, para evitar interferencias provocadas por rebotes con las superficies cercanas, por lo tanto estará colocada en la posición:

- $X=2.5$ m
- $Y=14.85$ m
- $Z=2.05$ m

Se puede observar esta colocación en la siguiente imagen:

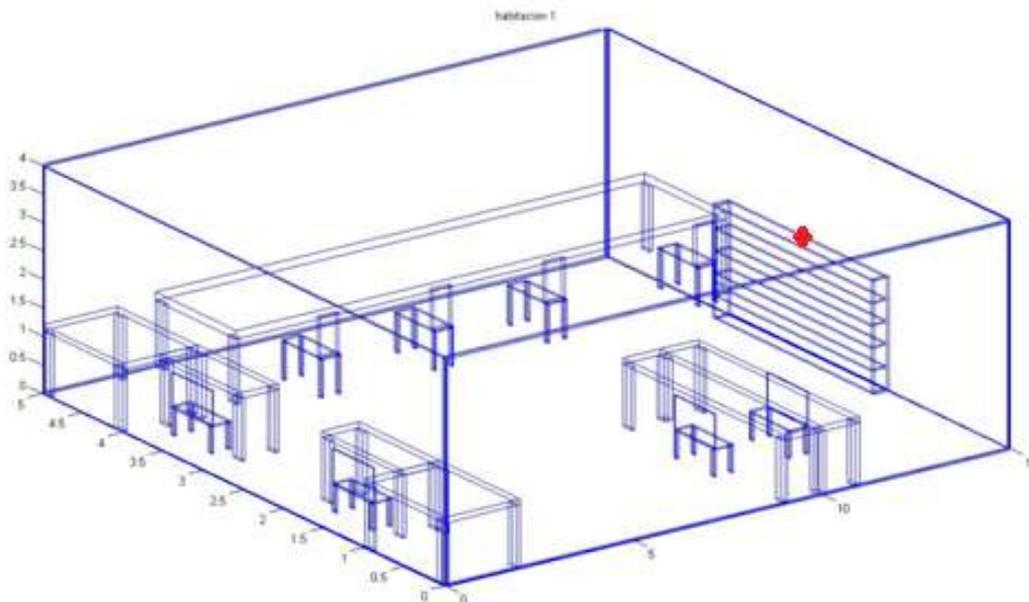


Figura 4.3: Simulación del JDA con la antena encima de la estantería

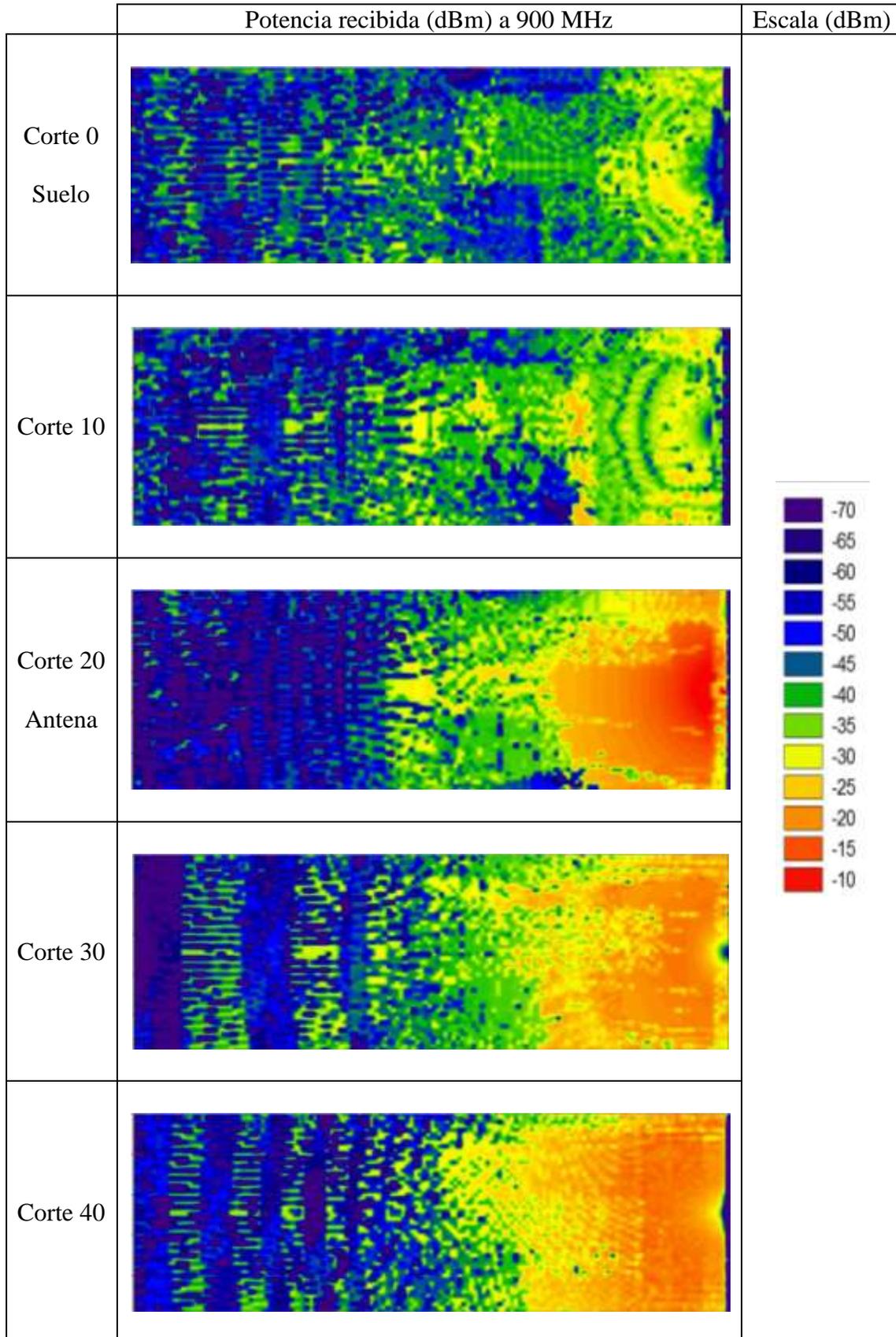


Tabla 4.4: Potencia Recibida a 900 MHz con fuente en estantería

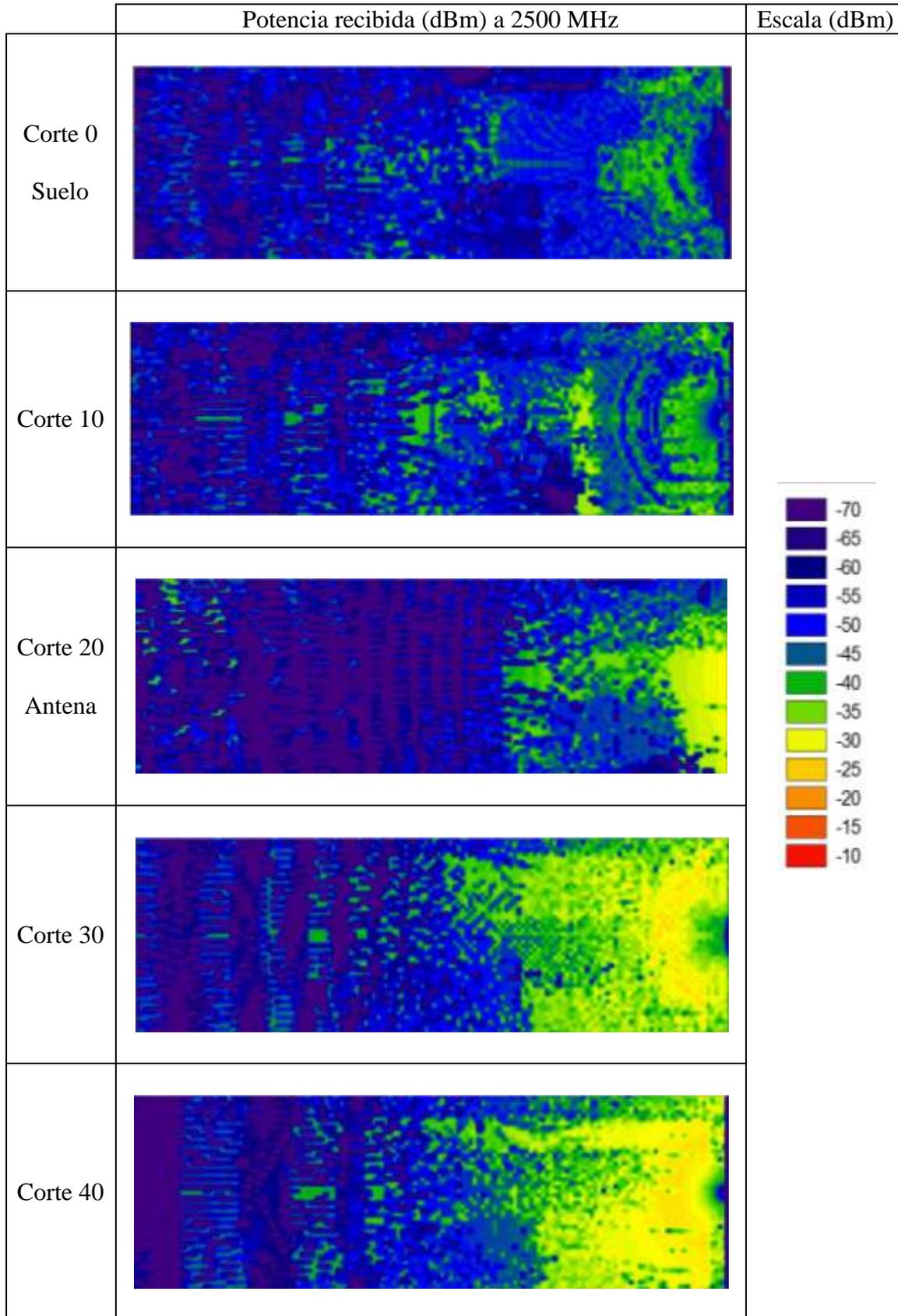
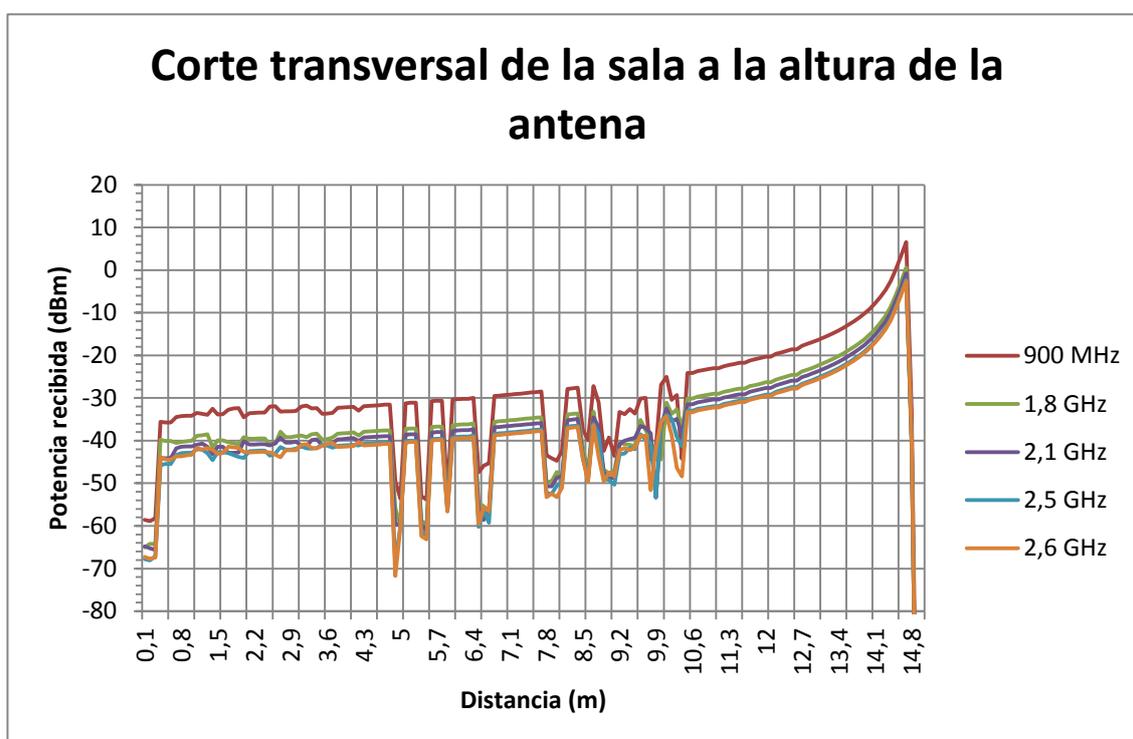


Tabla 4.5: Potencia Recibida a 2500 MHz con fuente en estantería

Como a simple vista se puede observar, hay bastantes diferencias entre emitir a una frecuencia o a otra. Aquí solo se han representado dos de estas frecuencias, suficientemente separadas entre sí para poder ver las diferencias con solo miraras. Las frecuencias elegidas han sido, al igual que en el caso anterior, las de 900 Mhz y la de 2500 MHz. En el Anexo 3 se mostrarán el resto de frecuencias, como en el caso de las simulaciones anteriores.

Para poder ver claramente la diferencia entre frecuencias, se van a presentar a continuación unas gráficas representativas de la sala. Estas frecuencias, al igual que en el caso anterior, serán: 900MHz, 1800MHz, 2100MHz, 2500MHz y 2600MHz.



Gráfica 4.8: Corte de la sala a diferentes frecuencias.

Como se esperaba, se puede ver claramente que al aumentar la frecuencia de emisión la potencia recibida en cada punto es menor, lo que, como se ha comentado antes, es función de la longitud de onda.

4.1.4. Resultados del escenario 1: Comparación con medidas reales

Para poder ver el correcto funcionamiento del código de trazado de rayos se van a utilizar una serie de medidas realizadas en este laboratorio. Las medidas se realizaron a la frecuencia de 2'445 MHz.

La antena estaba situada en la posición X= 9.94, y =3.5y a una altura Z de 60 cm. Con ésta posición de la antena se realizaron 3 medidas diferentes, en 3 hileras.

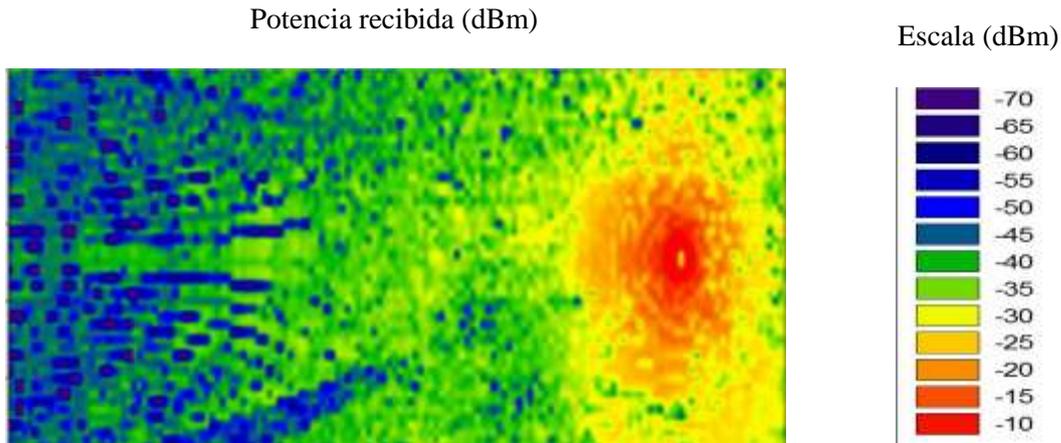


Figura 4.4: Potencia recibida con esta configuración

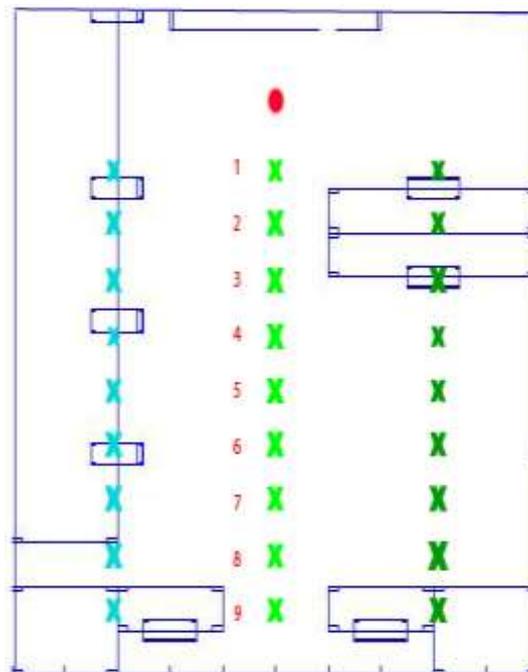
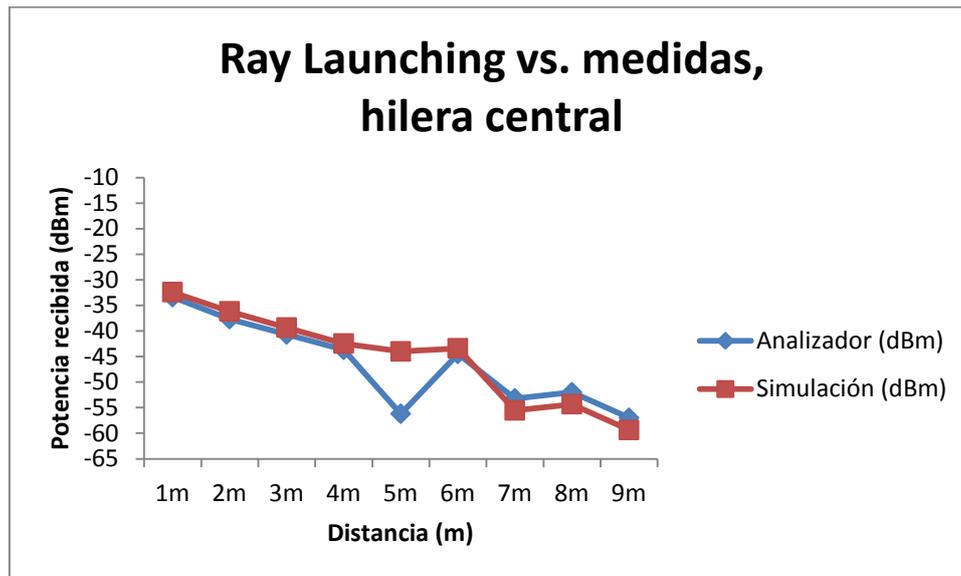


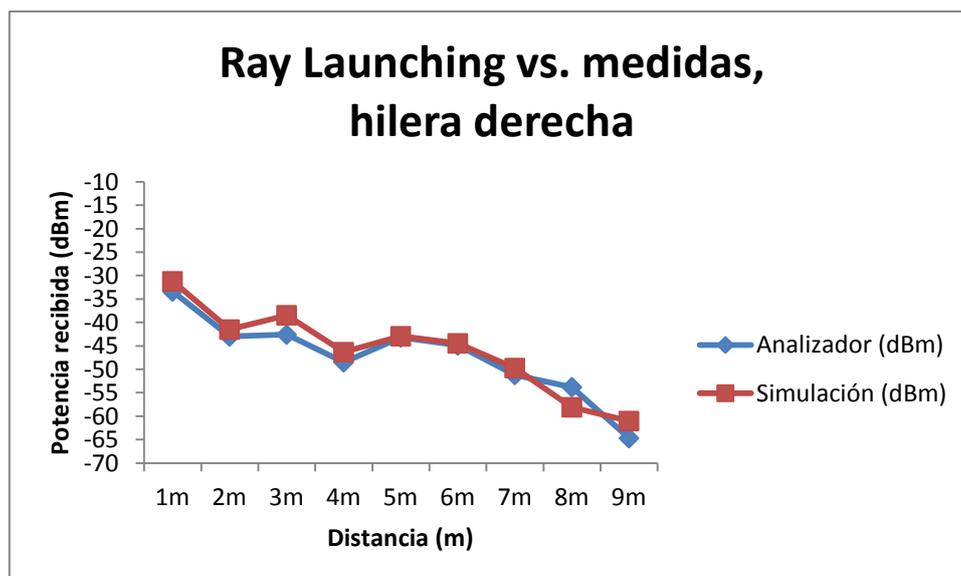
Figura 4.5: Posición de las medidas en el escenario

- La hilera central, de color verde claro, contiene nueve medidas espaciadas un metro entre sí:
- La hilera de la izquierda, de color azul, está igualmente espaciada con un metro de distancia y a 1,5 metros de la pared.
- Y del mismo modo, la hilera de la derecha, de color verde oscuro, tiene las medidas espaciadas 1 metro y a 1,5 metros de la pared.

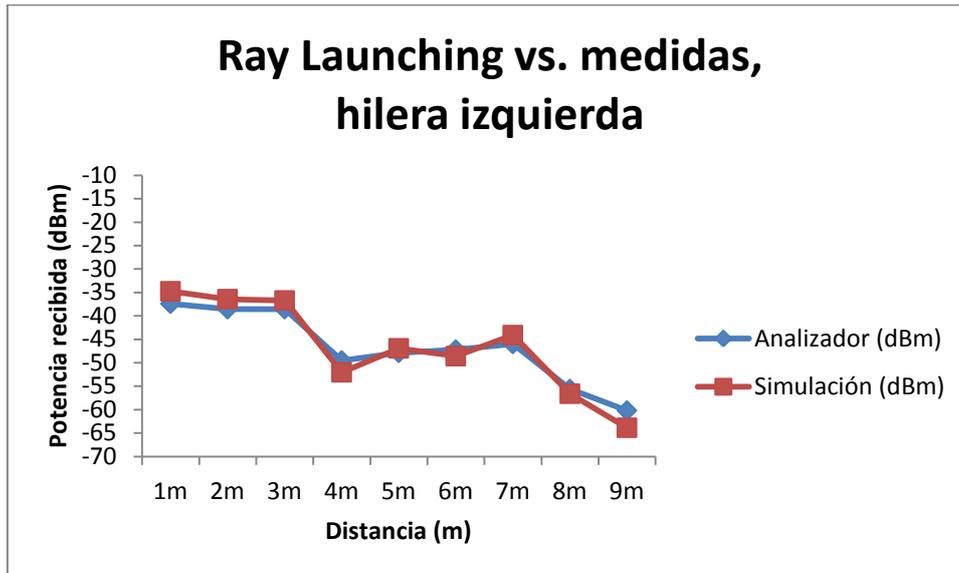
A continuación se presentan las gráficas comparativas de estas medidas con los resultados obtenidos con el código de *Ray Launching*.



Gráfica 4.9: Comparativa de la hilera central



Gráfica 4.10: Comparativa de la hilera derecha



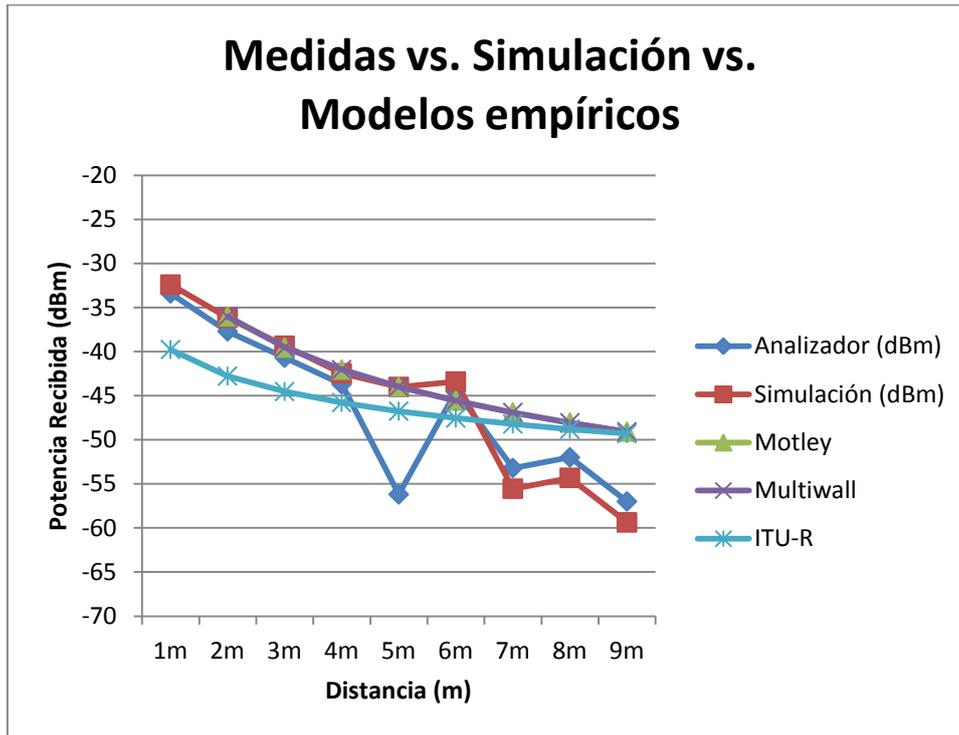
Gráfica 4.11: Comparativa de la hilera izquierda

A la vista de estos resultados podemos afirmar que el código de *Ray Launching* utilizado simula muy bien el espacio real ya que los datos se ajustan muy bien a las medidas obtenidas

En la hilera central se ve un fuerte cambio de nivel de señal que se ha obtenido con el analizador, que no se puede apreciar en la simulación. Esto es debido a las componentes multitrayecto de la señal real, que al simulador no le ha dado tiempo a calcular.

Del mismo modo, se ha procedido a comparar los datos de mediciones reales de la hilera central con los modelos empíricos Motley COST 231, ITU-R P.1238 y Multiwall. A su vez también se comparará, al igual que antes, con la simulación realizada con el código de *Ray Launching*.

Los resultados obtenidos han sido:



Gráfica 4.12: Comparativa de la hilera central con los modelos empíricos

Al ver los resultados se observa que los modelos empíricos, para este caso concreto, funcionan relativamente bien. Eso puede deberse a que las medidas se han realizado en línea recta y sin obstáculos intermedios.

De todas formas, vemos como el modelo ITU-R tiene una pérdida inicial superior a las medidas y a la simulación

4.2 Resultados escenario 2: despachos divididos.

La siguiente de las pruebas únicamente va a tener como objetivo corroborar algo que ya se da por cierto: que la diferencia de los materiales de un determinado obstáculo hace variar sustancialmente la propagación de ondas. Gracias a este estudio se van a poder observar claramente los diferentes fenómenos de la propagación, como la reflexión, refracción y difracción.

Para esta prueba se ha elegido un escenario pequeño con una pared que lo divide en dos habitáculos. Estos habitáculos podrían caracterizar dos despachos pequeños contiguos. Las dimensiones de este escenario son: 4x5x3 m. La pared que los separa siempre va a ser de 10 cm de grosor, pero se variarán sus materiales. Se van a hacer pruebas con una pared de cemento, otra de metal y varias más que mezclan estos dos materiales a modo de columnas.

Al ser un escenario basado en un escenario real la antena la será colocada en un lugar real de la sala. En este caso se va a colocar en la posición: 3,75 x 3,3 x 2,1 m (encima de una estantería, cuando la sala esté amueblada)

A continuación se van a mostrar los 3 ejemplos más representativos, una pared de cemento, una pared de metal y otra formada por una placa de metal y otra de cemento. Aunque estas paredes muestran los efectos deseados en el anexo 3 se han incluido 4 configuraciones más de paredes metal-cemento, utilizadas para profundizar más en los fenómenos de difracción y refracción.

Pared de cemento:

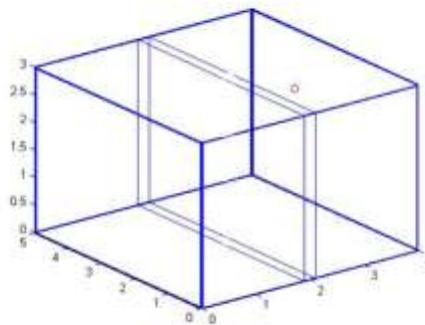


Figura 4.6: Escenario con la pared central de cemento

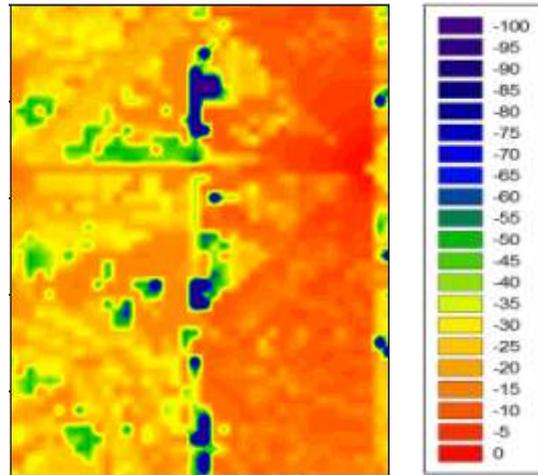
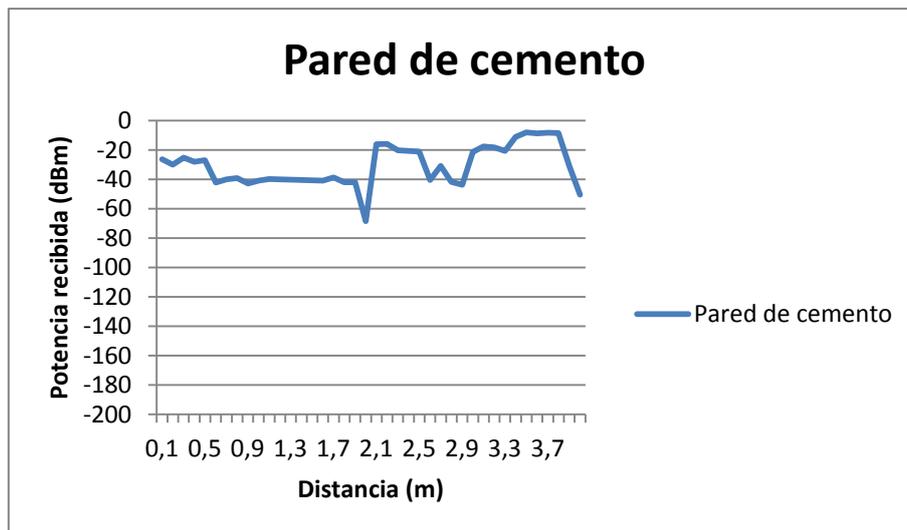


Figura 4.7: Potencia recibida a 900 MHz con pared de cemento



Gráfica 4.13: Potencia recibida con una pared de cemento

En este caso, la pared de cemento deja pasar toda la señal, atenuándola un poco al pasar por el muro, pero su distribución es constante, sin altibajos remarcables. El muro reduce unos 10-20 dBm la potencia transmitida, pero aun así la señal que llega es muy buena. Esta pérdida de potencia se debe principalmente a la refracción que sufren los rayos al pasar a través del cemento

Pared de metal

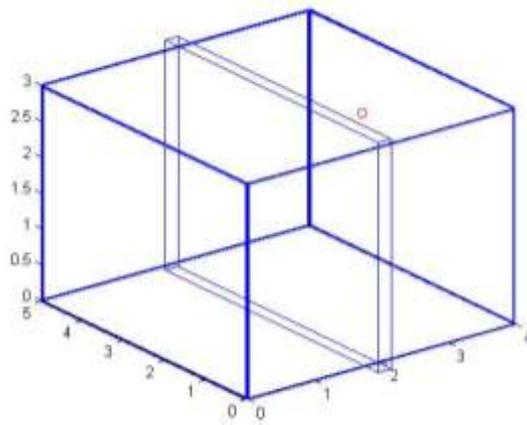


Figura 4.8: Escenario con la pared central de metal

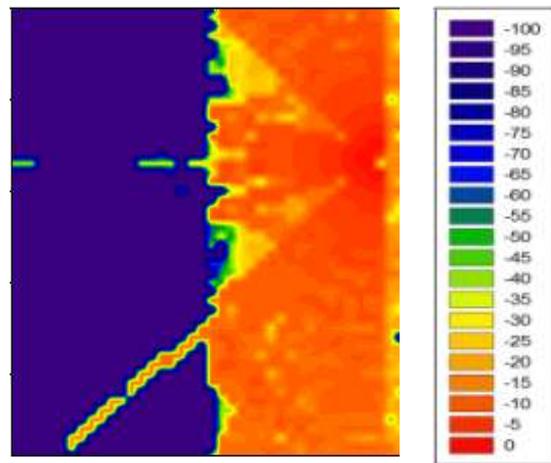
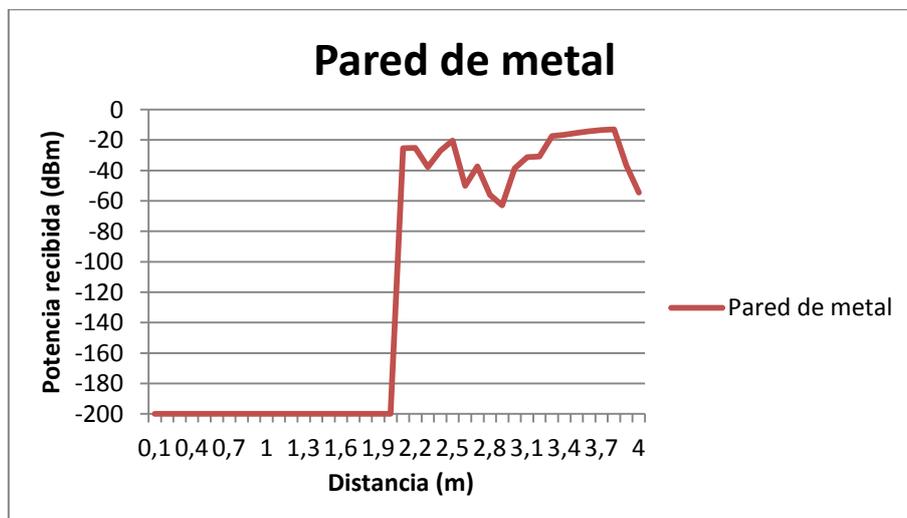


Figura 4.9: Potencia recibida a 900 MHz con pared de metal



Gráfica 4.14: Potencia recibida con una pared de metal

En este caso, tal y como cabía esperar, la pared de metal hace que los rayos se reflejen en ella evitando que pase nada al otro lado. El rayo que se observa es por un ligero error de cálculo en la simulación del código de *Ray Launching*.

Pared de cemento-metal

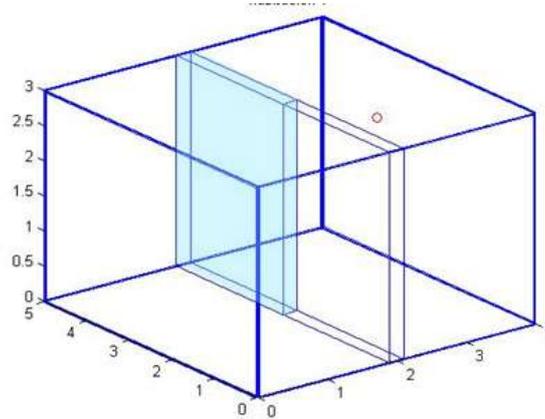


Figura 4.10: Escenario con la pared central de cemento y metal

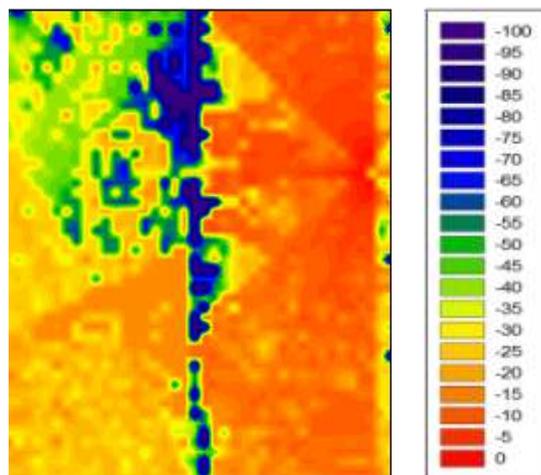
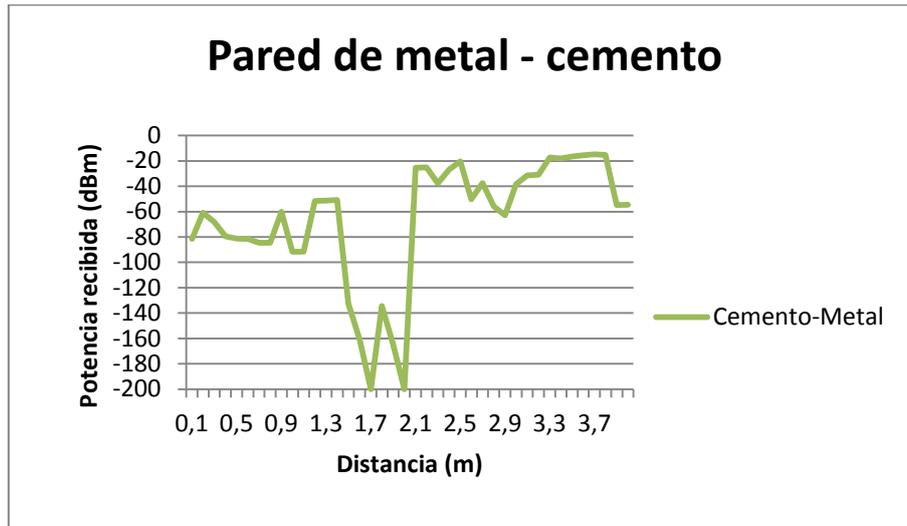


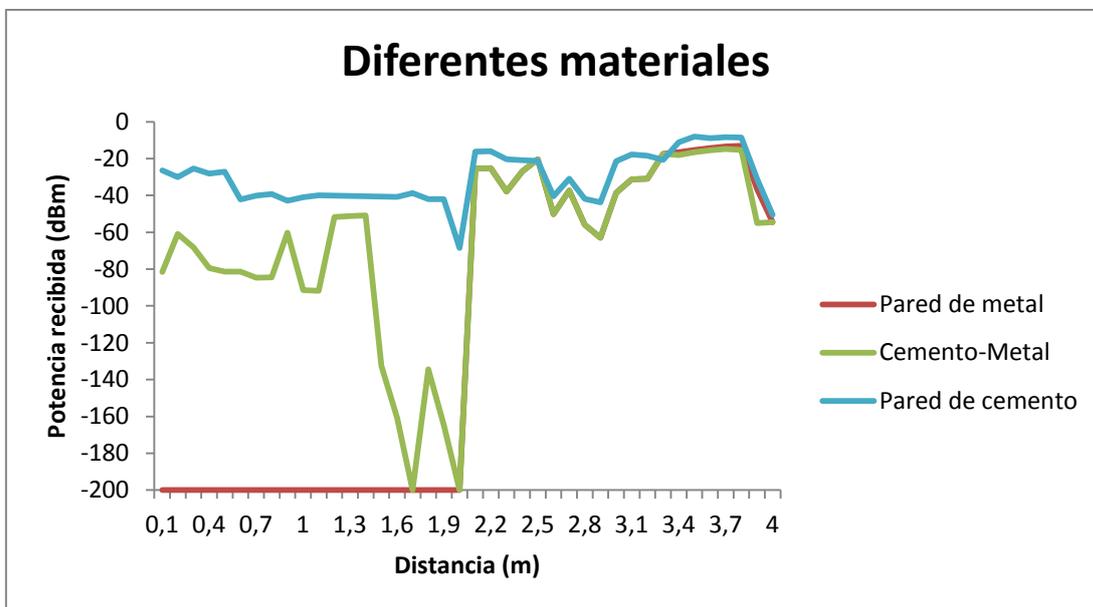
Figura 4.11: Potencia recibida a 900 MHz con pared de cemento y metal



Gráfica 4.15: Potencia recibida con una pared de cemento y metal

En este caso, como era de esperar, se observa cómo se unen los dos anteriores. Se puede ver como la señal busca una forma de pasar al otro lado y bordea el obstáculo metálico y llega detrás de este por medio de la zona de cemento. Se puede ver claramente como los rayos han evitado el problema.

En la siguiente gráfica podemos observar las diferencias entre todos los casos:



Gráfica 4.16: Potencia recibida con una pared de cemento y metal

4.3. Simulaciones proyecto MLMR

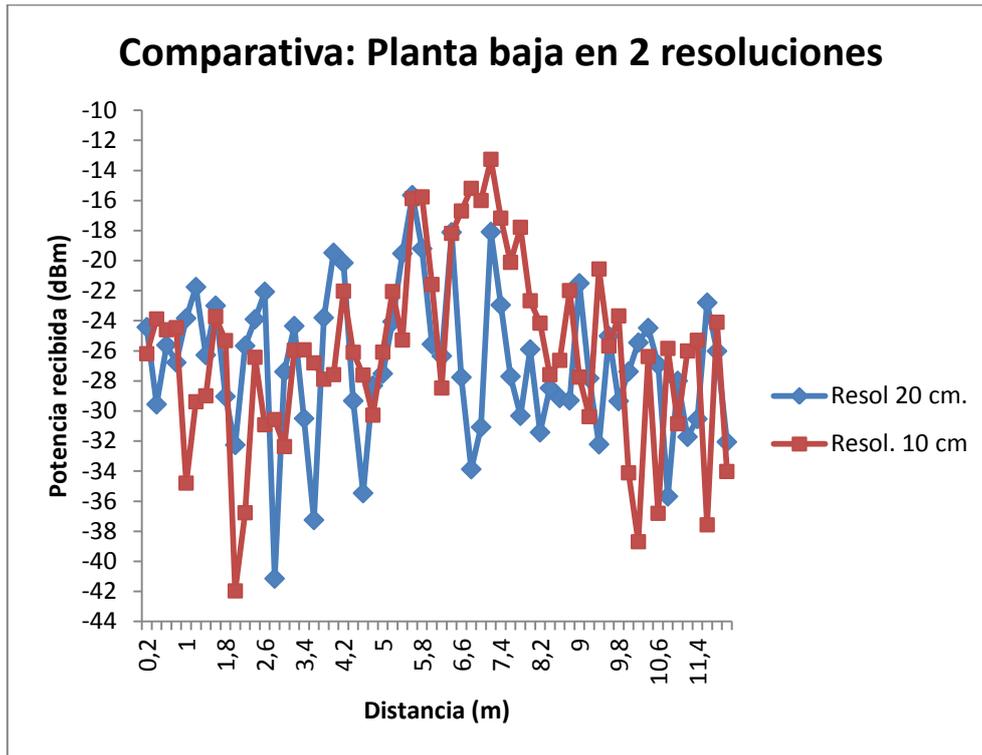
Como culminación de este proyecto se analizará un escenario complejo, un edificio de tres plantas. Los planos de este edificio han sido cedidos por el estudio de arquitectura MLMR Arquitectos Asociados y los resultados se les entregarán a modo de estudio o mapa de cobertura para la implantación de un sistema femtocelular en este edificio de nueva construcción.



Figura 4.12: Dibujo oficial del proyecto MLMR.

Para que la simulación resulte lo más fidedigna posible, se ha probado a situar la antena emisora en tres posiciones diferentes. En la primera se ha colocado en el techo de la planta baja, en el segundo escenario se ha probado colocando la antena en el techo de la planta superior y por último se colocó la antena en el techo del garaje. Lógicamente, lo que se va a intentar es colocar el mínimo número de antenas posibles para conseguir una cobertura aceptable dentro de la vivienda. Al ser un edificio de dimensiones considerables, sería lógico tener que desplegar más de una antena, por lo que podrían darse casos de interferencia co-canal. Todas estas simulaciones se realizaron con una resolución de 10cm y a las frecuencias representativas de 900MHz, 2'1GHz y 2'5GHz.

Para demostrar que la resolución elegida es la óptima para este proyecto, a continuación se muestra una comparativa entre la resolución inicial elegida de 20 cm, y la actual y optimizada. Se puede apreciar que con esta resolución no se obtienen datos ni tan altos ni tan bajos. Esto es debido al promediado que realiza el código de *Ray Launching*.



Gráfica 4.17: Comparación de resoluciones

La antena utilizada en las diferentes simulaciones ha sido la misma, una antena direccional radiando hacia el suelo. Como la resolución es de 10 centímetros la antena utilizada es menor de este tamaño para que no interfiera en el resultado de las simulaciones.

Para entender mejor los resultados se presentan a continuación tanto la escala utilizada como las plantas de los pisos que componen el edificio:

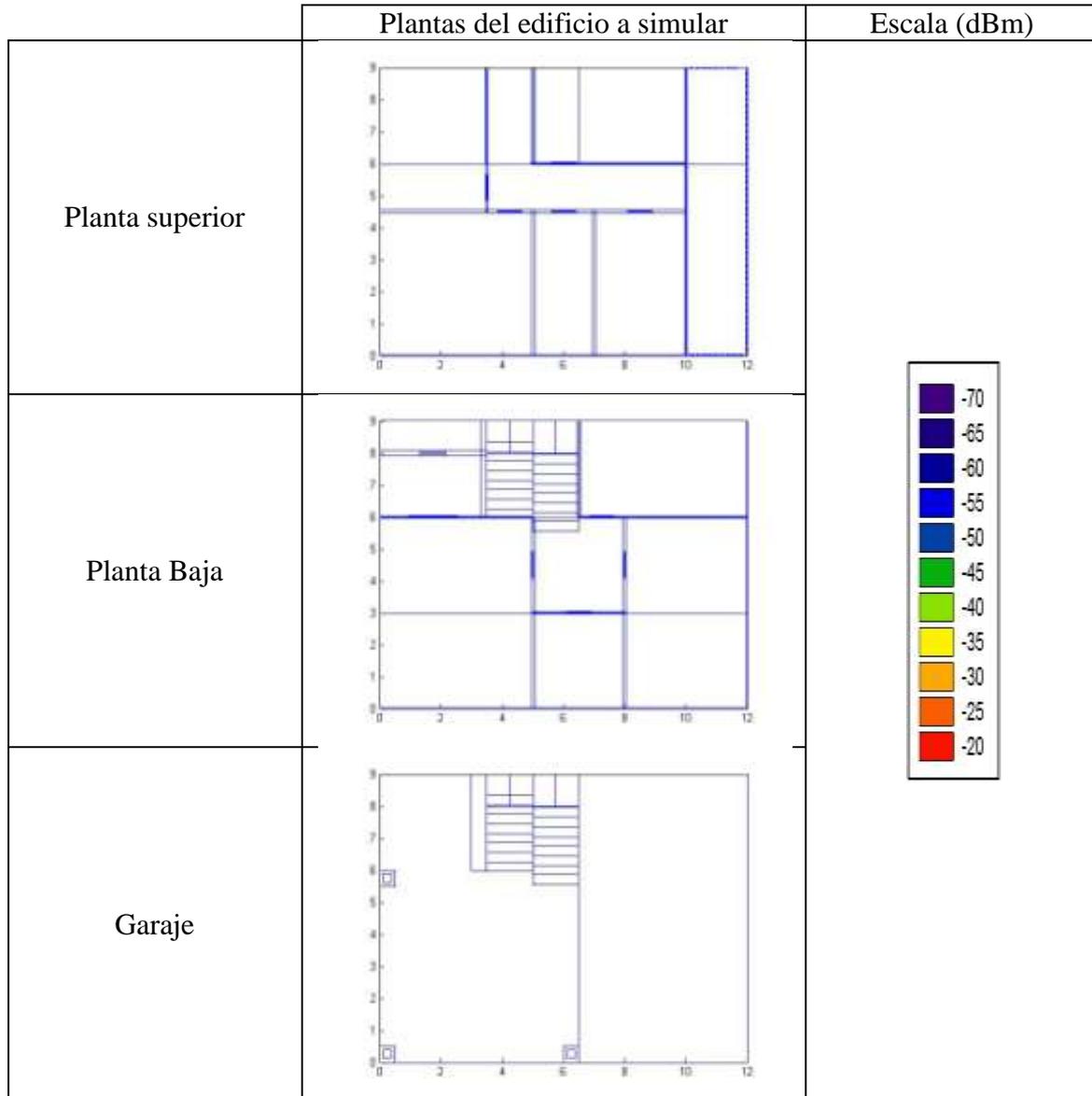


Tabla 4.6: Vistas de las plantas del edificio y escala.

En estas vistas del edificio se pueden apreciar tanto las paredes como los detalles que componen cada piso, como pueden ser las escaleras o las columnas del garaje

4.3.1 Escenario 1: Femtocelda en la Planta baja

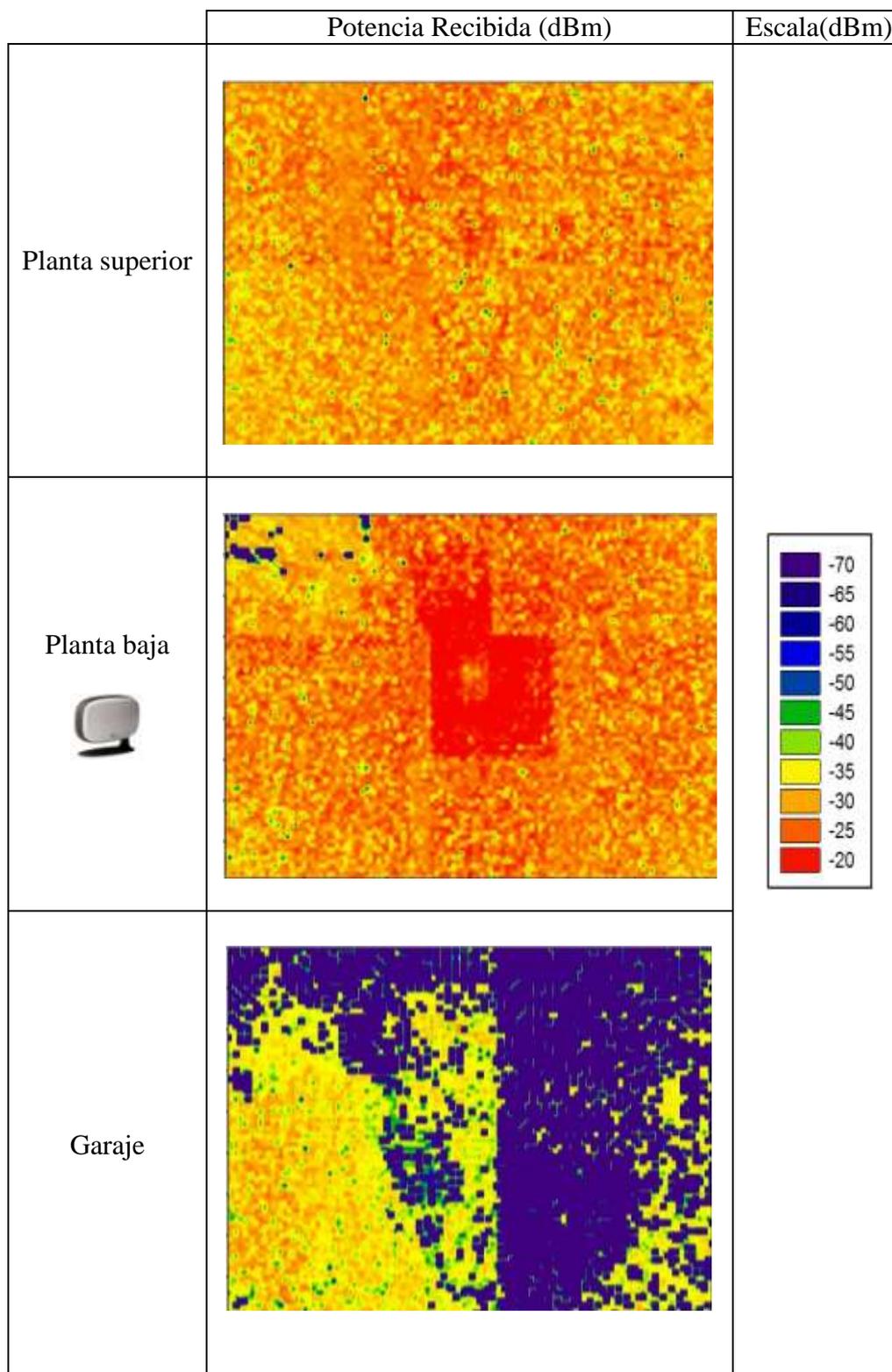


Tabla 4.7: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja

En este primer escenario podemos observar que la femtocelda tiene un óptimo nivel de cobertura en la planta baja, donde está situada. La potencia recibida en esta planta varía desde los -20 dBm hasta los -33dBm, para la banda de 900 MHz. Del mismo modo y para la misma frecuencia, al estar situada en el techo de esta planta, la planta superior obtiene una cobertura muy buena con unos valores de entre -26 y -42 dBm. El único problema se encuentra en el garaje, ya que la distancia es mayor y existen pequeñas zonas sin cobertura.

4.3.2. Escenario 2: Femtocelda en la planta superior

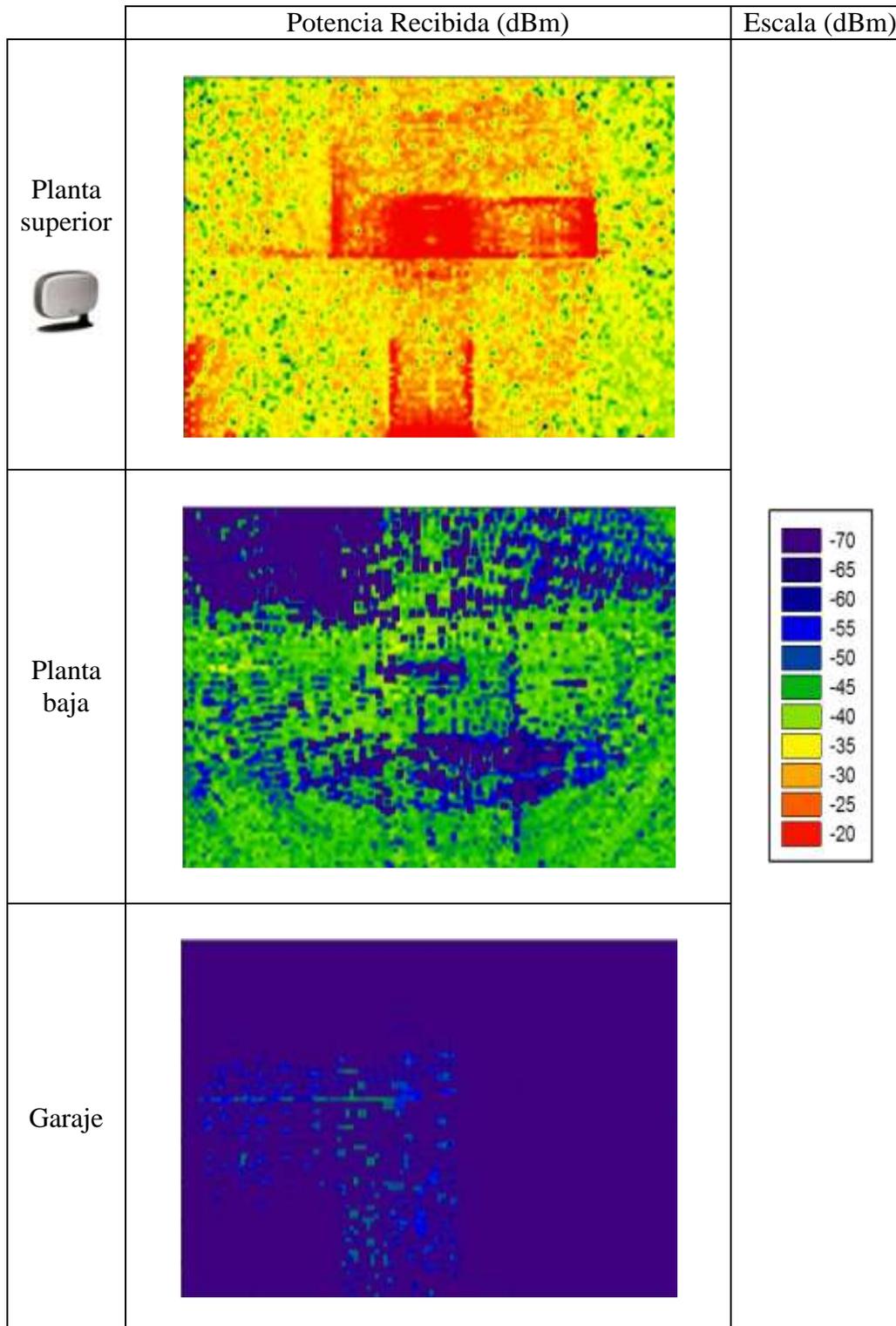


Tabla 4.8: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior

En este caso, la antena está situada en el techo de la planta superior. Cabe destacar que en esta planta contiene gran cantidad de cristal. Se aprecia que en esta planta es excelente, pero al contrario que en el primer caso, en el momento en el que se atraviesa un solo piso, se pierde mucha potencia, debido entre otras causas a la distancia que las separa. Esto se aprecia en la planta baja, donde tenemos varias zonas en las que no hay cobertura y otras con un nivel muy bajo, pero sobre todo lo vemos en el garaje, donde no llega casi en ningún punto señal.

4.3.3. Escenario 3: Femtocelda en el garaje

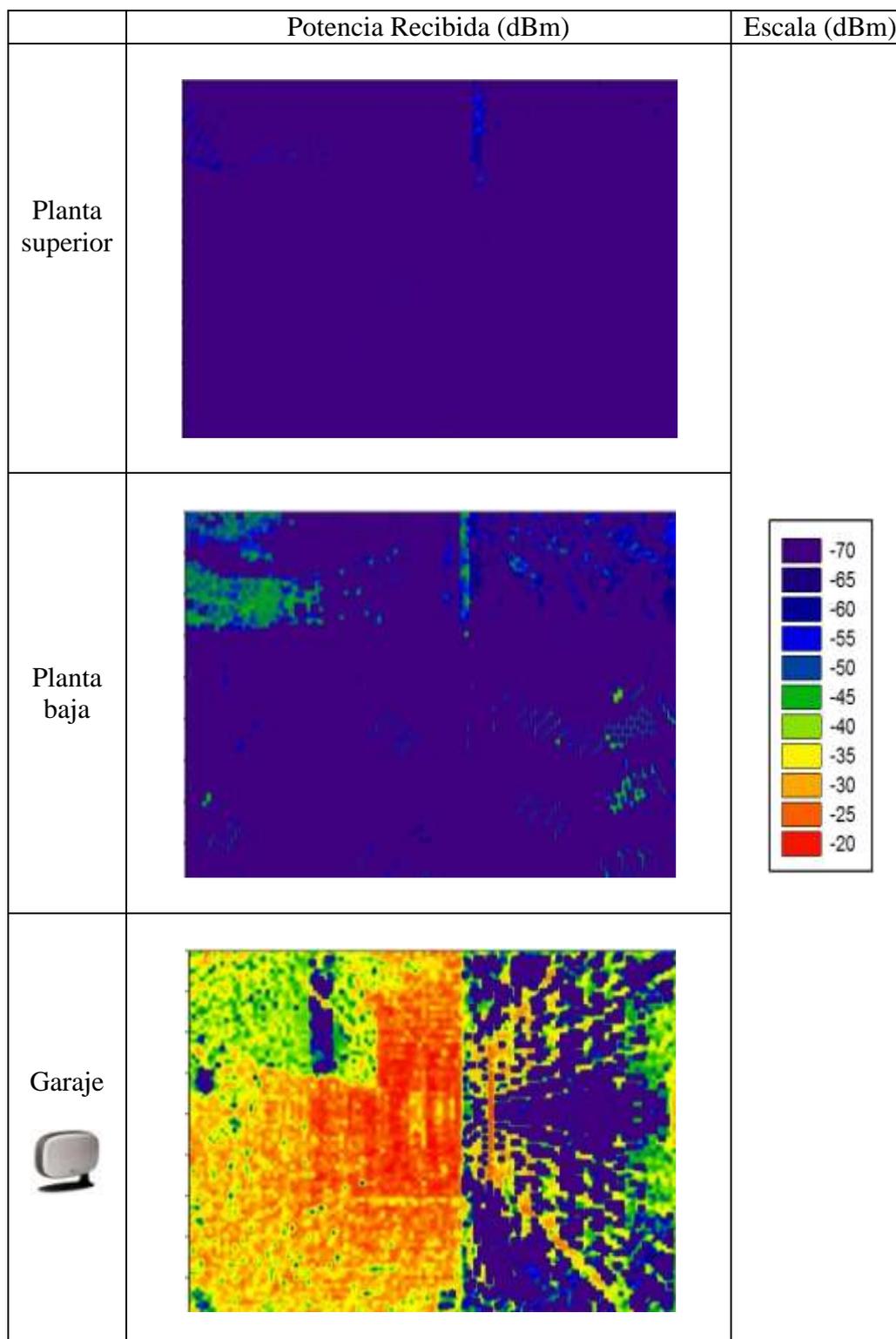


Tabla 4.9: Potencia recibida en las plantas con el emisor en el garaje

Por último, se hace referencia al caso de haber situado la antena en el garaje. Se ve que para esta planta la cobertura es muy buena, pero surge el mismo problema o incluso peor que cuando la antena estaba situada en la planta superior. La señal prácticamente no existe en la planta baja y en la superior directamente no existe. Esto claramente se debe a que el techo de esta planta, es más grueso que el del resto de la casa, ya que sirve de base para esta. Este aspecto, unido a que la antena es direccional, condiciona estos resultados.

Cabe destacar que a la vista de estas simulaciones, conforme aumenta la frecuencia de la señal, los valores recibidos son menores. Así, que aunque sigue siendo muy válida para la frecuencia de 2'5 GHz, la frecuencia de la tecnología LTE, como se verá en los anexos (Anexo 3), los valores recibidos son sensiblemente menores que para 900 MHz que es la frecuencia referencia que se ha tomado para los servicio GSM y UMTS. Las simulaciones en la banda de 2100 MHz, tiene valores que se sitúan entre las anteriores y también sirve de base para señales de 3G UMTS y HSDPA.

Con el fin de apreciar bien esta diferencia se han sacado algunos cortes de la habitación, tal y como se muestra en la siguiente figura:

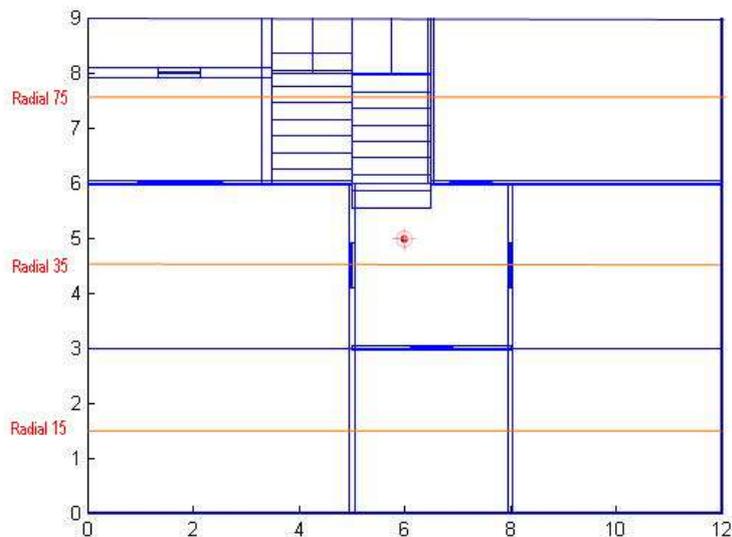


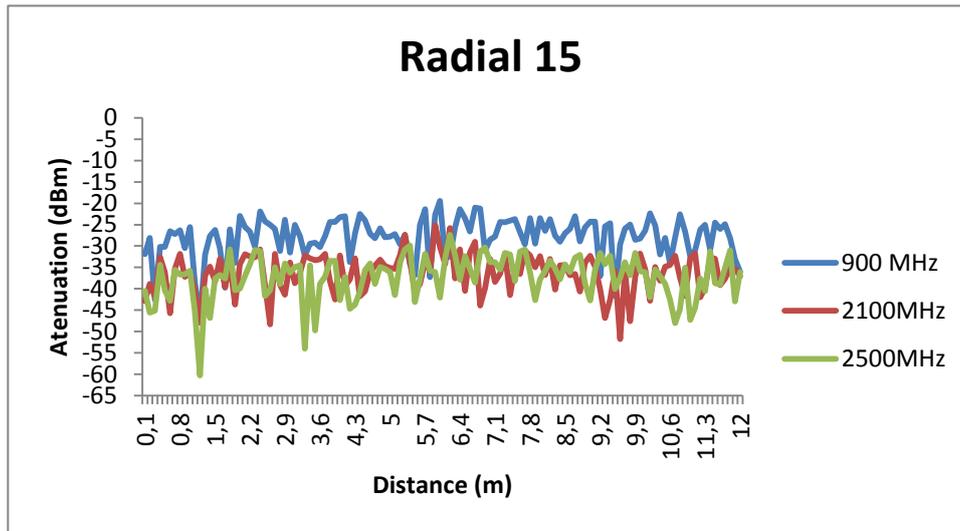
Figura 4.13: Radiales del edificio MLMR

Tomando el eje de coordenadas tal y como está puesto en la figura, la antena se ve situada en el punto $X=6m$ $Y=5m$. Y los cortes son los siguientes:

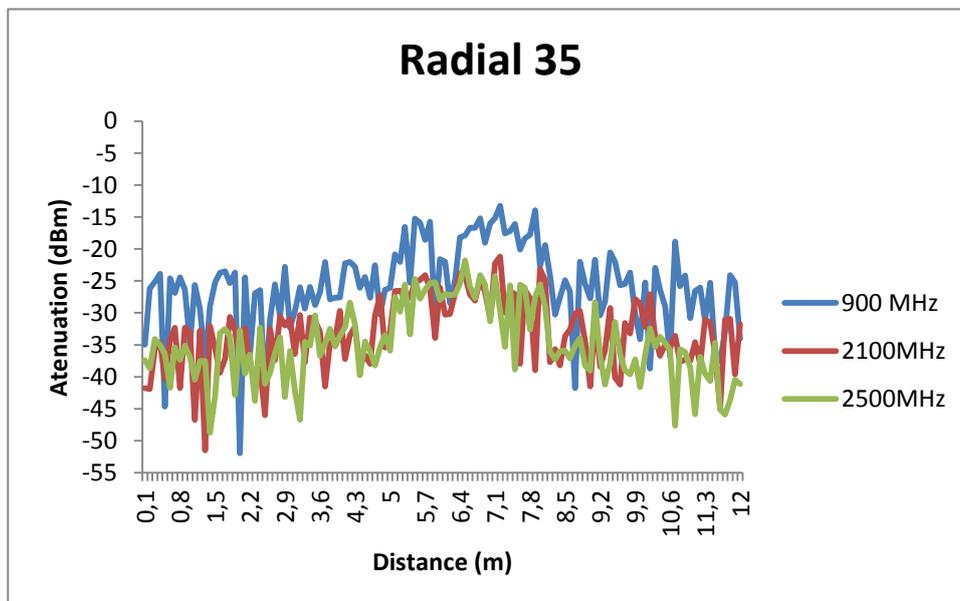
- Radial 15= corte en el eje Y=1.5m
- Radial 35= corte en el eje Y=4.5m
- Radial 75=corte en el eje Y = 7.5m

En todos estos casos el corte se realiza a una altura de 1.5m del suelo, o lo que es lo mismo, la mitad de la altura de la habitación.

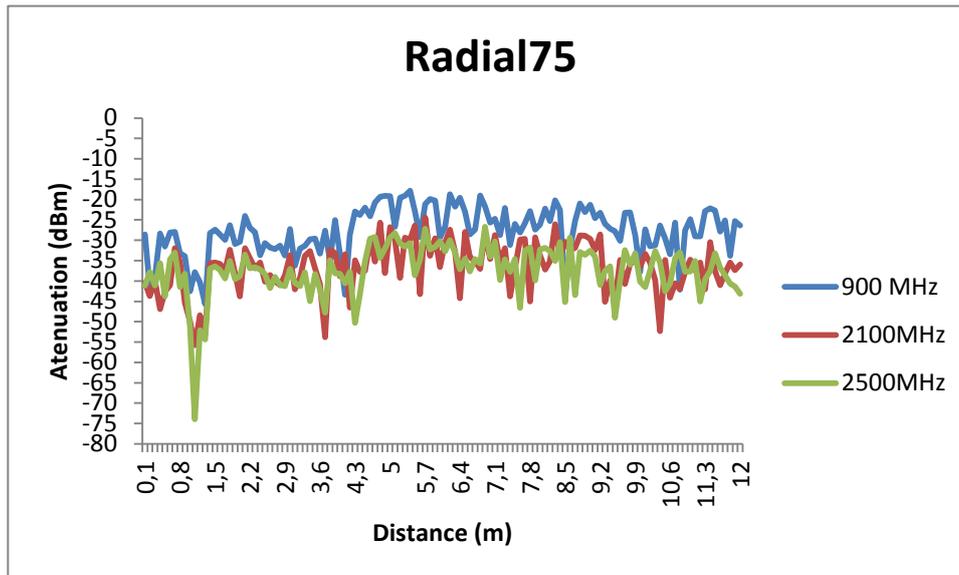
A continuación se van a mostrar estos cortes:



Gráfica 4.18: Radial 15



Gráfica 4.19: Radial 35



Gráfica 4.20: Radial 75

Una vez revisados y analizados los resultados, se puede concluir que la mejor configuración será la de una femtocelda en el techo de la planta baja, aunque la variación de altura sobre esta planta podrá mejorar la calidad de señal en el garaje sin comprometer el nivel de señal de la planta superior.

4.3.4. Comparativas

Al finalizar este proyecto, el edificio aún no está construido, por lo que no se puede comprobar si los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas con el código de lanzamiento de rayos son verídicos. Al no poder contar con medidas reales del edificio, no se puede concluir que estos datos sean reales, únicamente se podrán tomar como una aproximación al comportamiento de un sistema femtocelular. De todas formas, se ha optado por compararlas con los resultados obtenidos de introducir los mismos parámetros que en las simulaciones en alguna de las fórmulas de los modelos empíricos para radiopropagación en interiores estudiados.

Pese a esto, el trazado de rayos, puede ser comparado con los modelos empíricos más habituales como son el Motley COST231, modelo Multi-wall y modelo ITU-R - P.1238.

Los modelos escogidos para la comparación han sido:

- Modelo Multi-wall

$$L = L_{FS} + L_C \sum K_{wi} L_{wi} + n \left(\frac{n+2}{n+1} - b \right) L_f \quad (dB)$$

- Modelo ITU-R P. 1238

$$L = 20 \log(f) + N \log(r) + L_f n - 28 \quad (dB)$$

- Modelo Motley COST 231

$$L(d) = L_M + 10 n \log(d) + L_{ap} + L_0 + k_f L_{FW} \quad (dB)$$

Esta comparativa servirá para ver la idoneidad del trazado de rayos a la hora de realizar este estilo de estudios. Para ello se han elegido tres escenarios distintos, basados todos ellos en este edificio. En el primero, el rayo lanzado tendrá que atravesar una única pared. En el segundo, se hará la prueba de tener que atravesar un piso y por último la prueba consistirá en ver el efecto del rayo al atravesar dos paredes.

- Caso A: El rayo atraviesa una pared
- Caso B: El rayo atraviesa un piso
- Caso C: El rayo atraviesa dos paredes

A continuación se muestran estos casos, A, B, C:

Caso A: Atravesar una pared

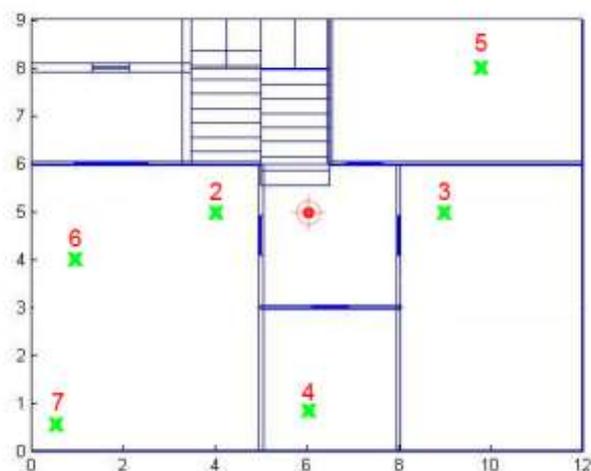
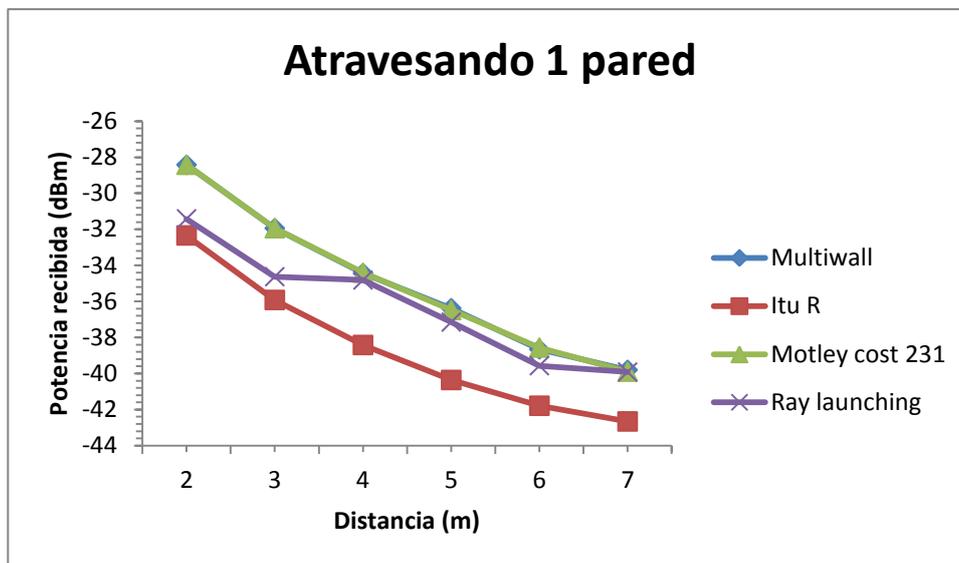


Figura 4.14: Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso A”

	Potencia recibida (dBm)					
	2 metros	3 metros	4 metros	5 metros	6 metros	7 metros
Mutiwalll	-28,42	-31,94	-34,44	-36,38	-38,66	-39,8
ITU R	-32,34	-35,92	-38,42	-40,36	-41,79	-42,66
Motley Cost 231	-28,42	-31,94	-34,41	-36,48	-38,56	-39,9
Ray launching	-31,41	-34,62	-34,81	-37,14	-39,56	-39,91

Tabla 4.10: Modelos Vr Ray Launching en Caso "A"



Gráfica 4.21: Gráfico comparativo de una pared

CASO B: Se tiene en cuenta un piso

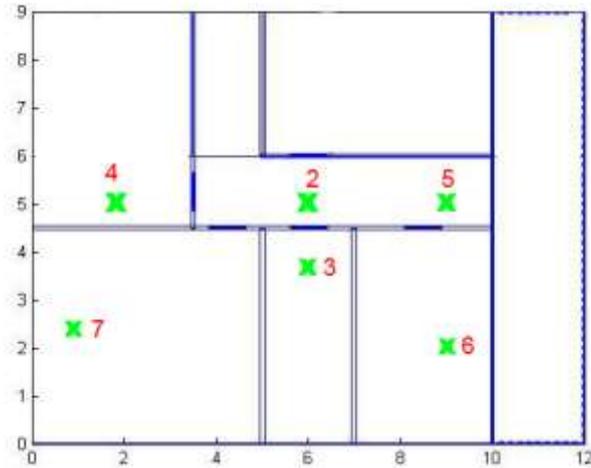
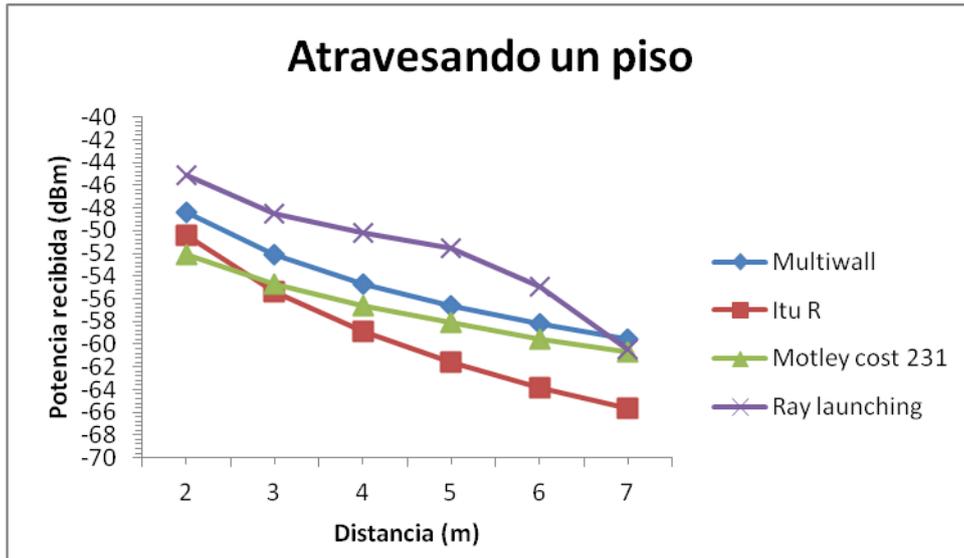


Figura 4.15: Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso B”

	Potencia recibida (dBm)					
	2 metros	3 metros	4 metros	5 metros	6 metros	7 metros
Multiwall	48.44	52.16	54.6	56.6	58.18	59.5
ITU-R	50.43	55.36	58.86	61.54	63.79	65.66
Motley COST231	52.16	54.66	56.6	58.1	59.52	60.68
Ray Launching	45.14	48.45	50.17	51.56	54.88	60.43

Tabla 4.11: Modelos Vr Ray Launching en Caso “B”



Gráfica 4.22: Gráfico comparativo de un piso

Caso C: Atravesar dos paredes

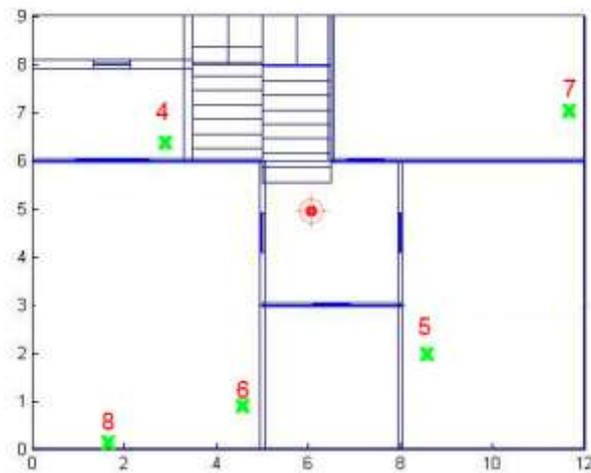
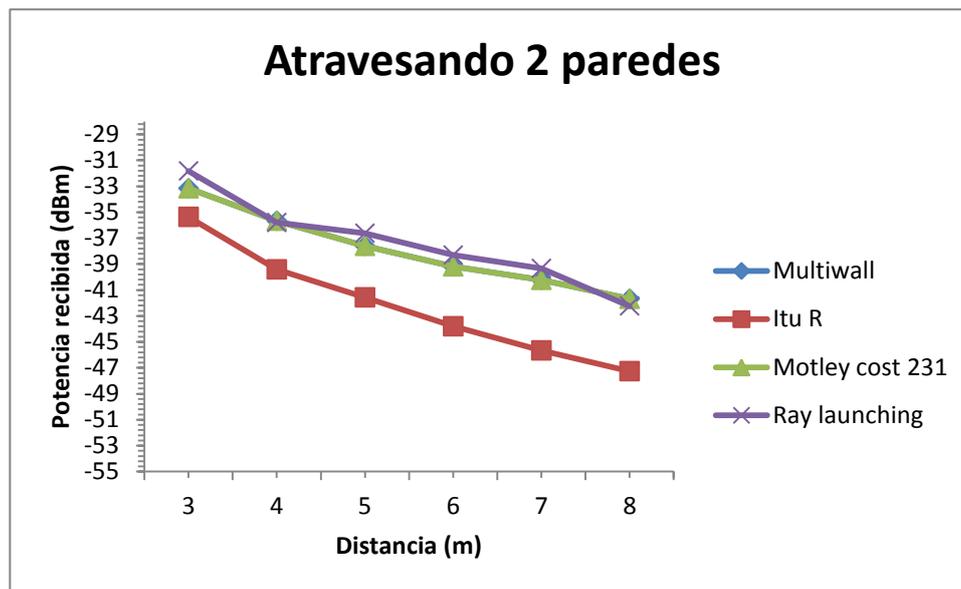


Figura 4.16: Posición de antenas (en metros desde la antena) en “Caso C”

	Potencia Recibida (dBm)					
	3 metros	4 metros	5 metros	6 metros	7 metros	8 metros
Multiwall	-33,16	-35,66	-37,6	-39,18	-40,22	-41,68
Itu R	-35,36	-39,41	-41,57	-43,799	-45,66	-47,26
Motley COST 231	-33,16	-35,66	-37,6	-39,18	-40,22	-41,68
Ray launching	-31,81	-35,79	-36,61	-38,30	-39,33	-42,22

Tabla 4.12: Modelos Vr Ray Launching en Caso "C"



Gráfica 4.23: Gráfico comparativo de dos paredes

4.3.5. Interferencias en el proyecto MLMR

Una vez comprobado que la posición de la fuente es la óptima se va a hacer un estudio de las posibles interferencias que podrían darse y que por lo tanto empeorarían la calidad de la señal. Estas son la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente.

4.3.5.1. Interferencia Co-Canal

La interferencia co-canal, como se ha visto antes, es aquella en la que dos sistemas inalámbricos emiten a la misma frecuencia y con la misma polarización. Para representar esto, se ha tomado como escenario la planta baja del edificio y se han colocado dos femtoceldas o antenas emisoras:

- La antena A esta situada en el techo de este piso, situado en $x=6$, y $4,5$ y $z = 2,9$ metros.

- La antena B está situada en el techo de la segunda planta, situada en $x=6$, $y = 4,5$ y $z = 2,4$ metros

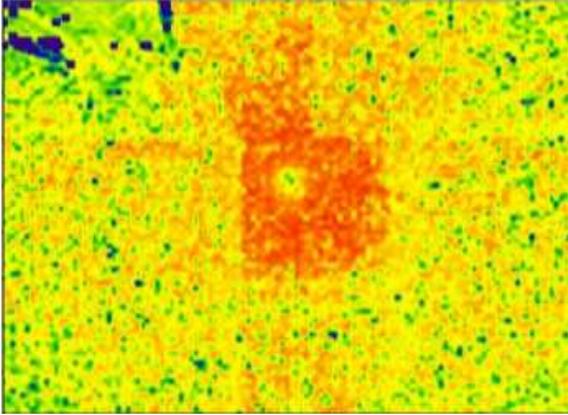
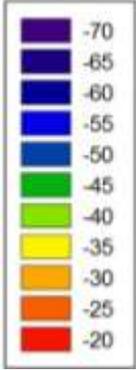
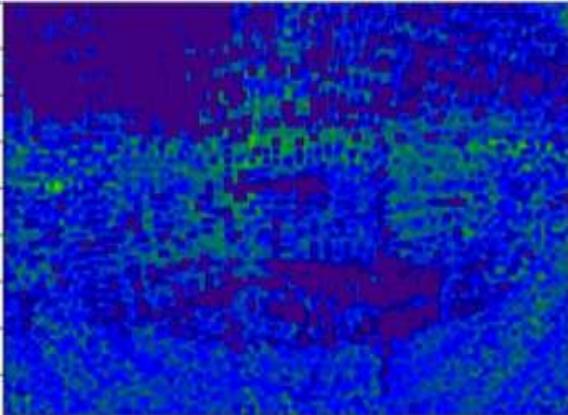
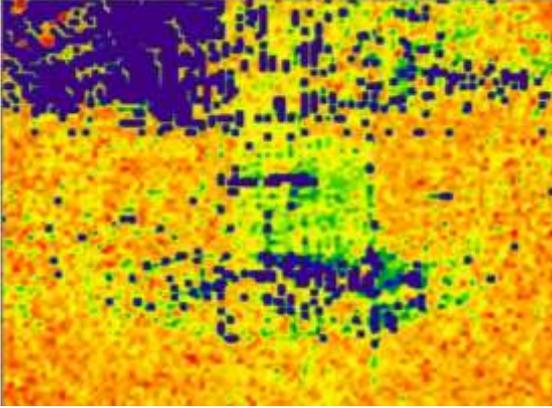
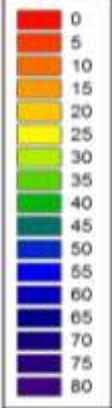
	Potencia recibida (dBm)	Escala (dBm)
<p>Frecuencia emitida por la femtocelda A: 2100MHz</p>		
<p>Frecuencia emitida por la femtocelda B: 2100MHz</p>		
<p>SNR de la planta baja</p>		

Tabla 4.13: Interferencia Co-Canal

4.3.5.2. Interferencia Canal adyacente

En este caso se pretende estudiar el efecto de la interferencia de Canal Adyacente. Este tipo de interferencia, como ya se ha comentado, es debido, principalmente a un mal filtrado de la señal, ya que estos permiten el paso de ciertas frecuencias cercanas o parte de estas en la banda pasante, degradando la señal.

Para comprobar este efecto se ha utilizado una simulación compleja. Mediante un total de dieciséis antenas de potencia $P=-60dBm/16$ se ha creado un frente de ondas similar al que se generaría en una macrocelda externa situada en las inmediaciones de la vivienda con una potencia total de $-60dBm$ y una frecuencia de 2100 MHz. La señal se supone que penetrará en la vivienda a través del cristal, ya que es una zona de fácil transmisión.

La antena A, la de la femtocelda, está situada en el techo de este piso, en la posición de ejes: $x=6$, $y=4,5$ y $z=2,9$ metros.

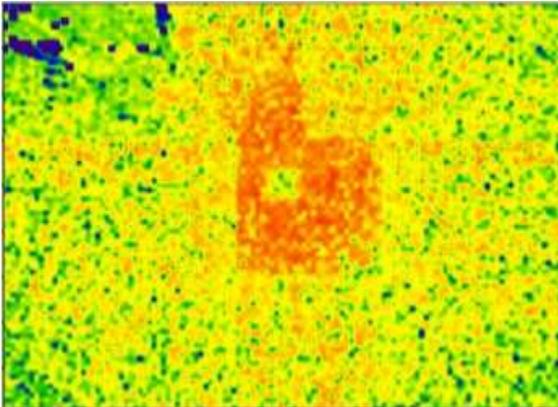
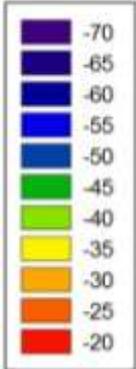
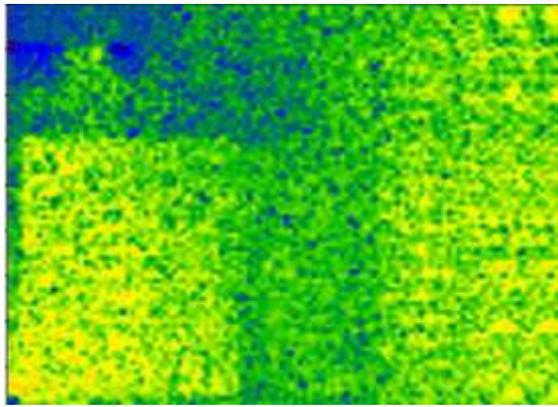
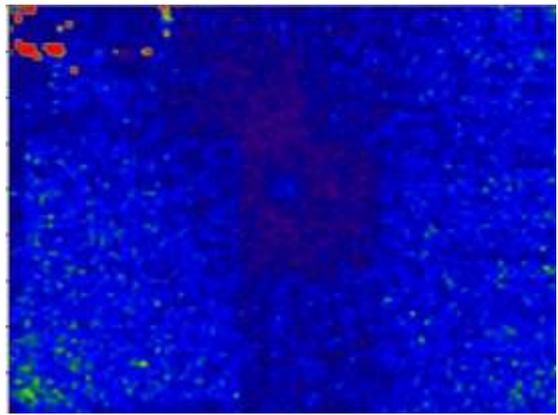
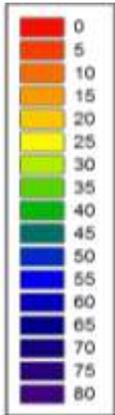
	Potencia recibida (dBm)	Escala (dBm)
<p>Frecuencia emitida por la femtocelda A: 2450MHz</p>		
<p>Frecuencia emitida por una macrocelda externa: 2100MHz</p>		
<p>SNR de la planta baja</p>		

Tabla 4.14: Interferencia canal adyacente

4.3.5.3 Relación Señal a Ruido

Para comprobar el efecto negativo del ruido en la captación de la señal se han generado las respuestas a una serie de ruidos constantes, comenzando en un ruido de -95 dBm hasta llegar a un ruido de -60 dBm.

Para calcularlos se ha hecho un relación señal a ruido (SNR) del valor que se ha obtenido emitiendo con una femtocelda a una frecuencia de 2100 MHz.

Tras calcular el ruido térmico, este es considerando nulo ya que es un valor muy próximo a 0, de forma que la SNR se ha calculado como:
 $SNR = Potencia_{Femtocelda} - Ruido$. Ambos valores expresados en dBm.

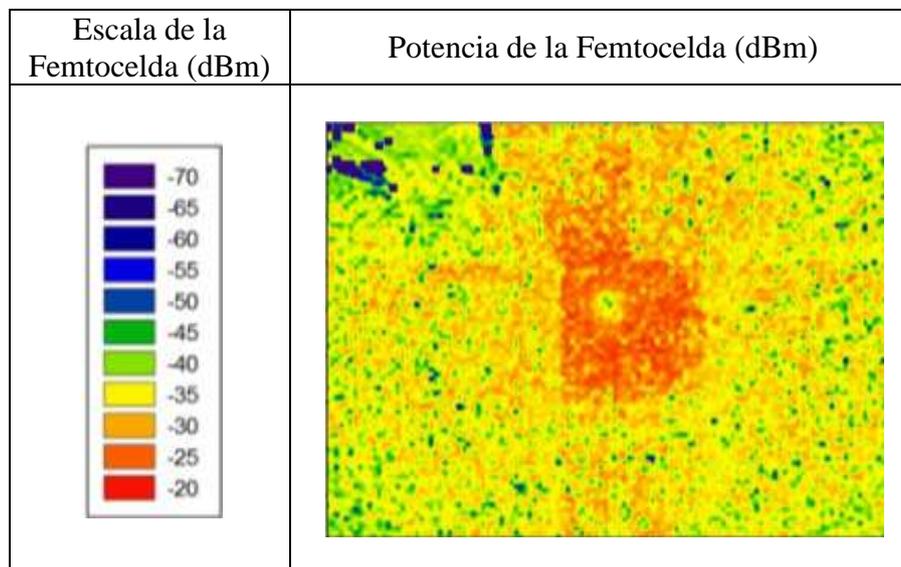
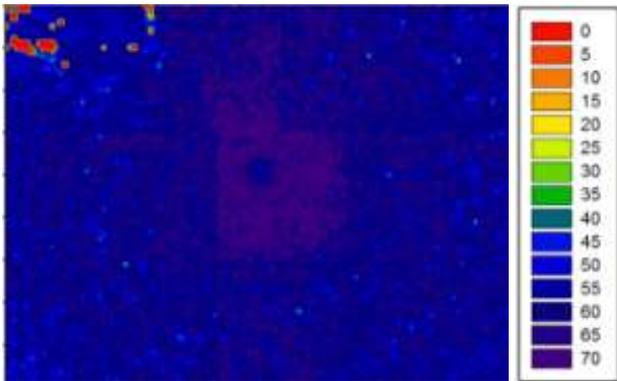
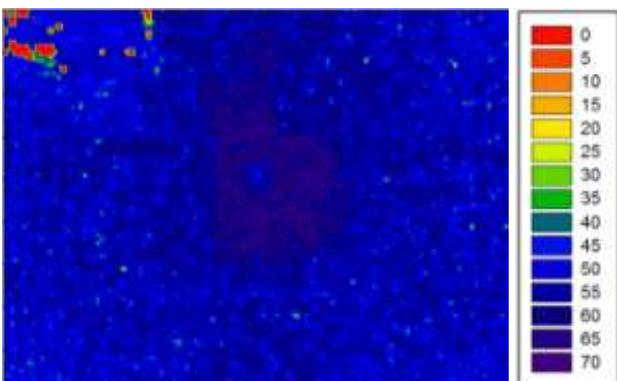
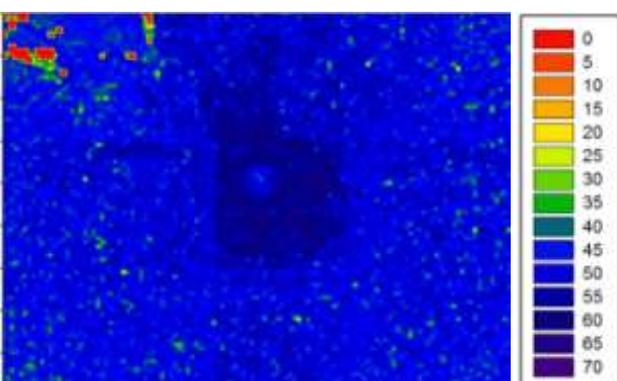
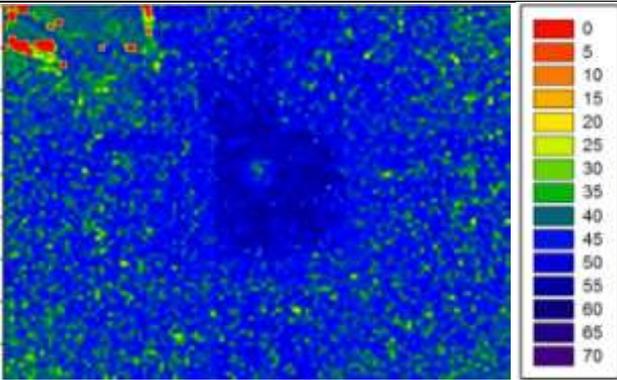


Tabla 4.15: Potencia de emisión de la femtocelda exenta de ruido

A continuación se presentan, en la tabla 4.16, el resultado de aplicarle a la potencia emitida por la femtocelda, que se puede ver en la figura anterior 4.15, un ruido uniforme de diferentes potencias. Esto dará como resultado lo que buscamos, la SNR del edificio

Tabla de los diferentes resultados de SNR con ruido uniforme:

SNR con ruido de:	Potencia Recibida y Escala utilizada (dBm)
-95 dBm	
-90 dBm	
-85 dBm	
-80 dBm	

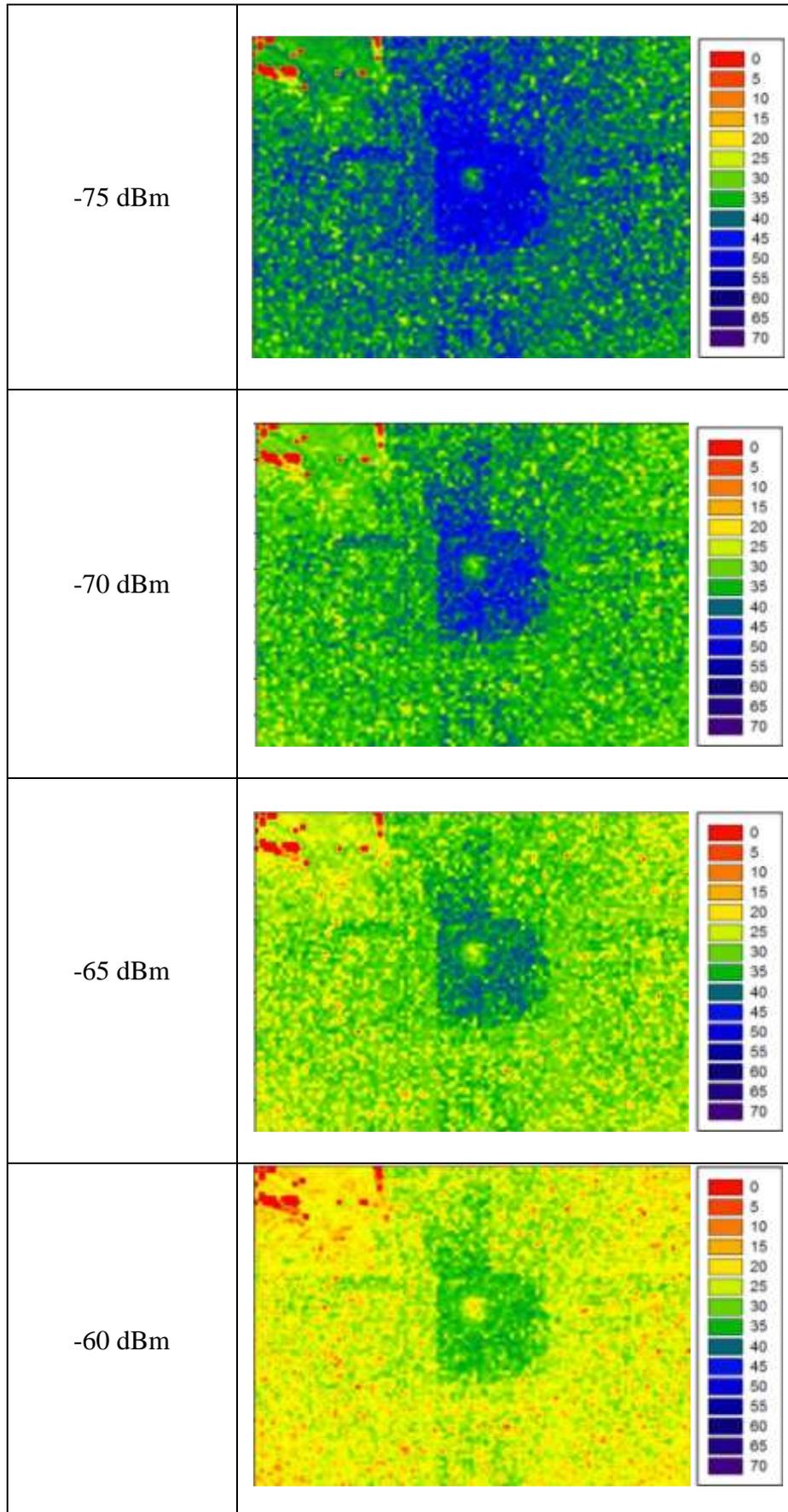


Tabla 4.16: SNR para diferentes potencias de ruido

Como era de esperar, cuanto menos ruido haya presente más alta será la SNR para esa señal. Como se puede apreciar a -60 dBm. La SNR es prácticamente perfecta para todos los puntos ya que tiene unos valores de entre 10 y 35 dBm. Esto hace que para este edificio no haga falta tener en cuenta este parámetro porque muy rara vez encontraremos una señal interferente de tanta potencia.

CAPÍTULO V

5.1. Conclusiones

El “*Smallcell Forum*” (antes denominado “*Femtocell Forum*”) propone las femtoceldas como el nuevo punto de convergencia fijo-móvil. Estas podrían servir no solo como un medio de aumentar la capacidad y cobertura de la red en entornos interiores, sino como una nueva oportunidad para la automatización del hogar, porque permite el uso de aplicaciones domóticas desarrolladas por los fabricantes para tal fin, garantizando así al usuario fiabilidad, control, seguridad y comodidad.

A pesar de tener ya varios años de existencia y muchas ventajas tanto tecnológicas como en sus aplicaciones, no son muy utilizadas debido a que las grandes compañías han seguido apostando por un sistema comercial basado en las antiguas redes. Esto debería comenzar a cambiar a lo largo este año, puede que del siguiente, debido en parte a que las antiguas tecnologías han quedado obsoletas para cierto tipo de servicios. Además, la tendencia actual es la de ir abandonando las redes en uso, denominadas 3G o 3.5G, para ir adaptándose a las nuevas redes de cuarta generación LTE.

Debido a la imposibilidad de contar con un punto de medida femtocelular específico, y al hecho de que son unos dispositivos que emiten a baja potencia, los valores de potencia recibida presentarán variaciones que deben ser tenidas en cuenta de manera precisa. Para ello se han realizado tanto simulaciones sobre modelos empíricos como mediante lanzamiento de rayos 3D o *Ray Launching*, obteniendo en este último caso, información relevante ligada al valor de señal esperado.

Los modelos empíricos utilizados no se asemejan mucho a las medidas realizadas en los locales a diferencia del modelo de *Ray Launching*. Los modelos empíricos no son lo suficientemente exactos porque se basan solo en la distancia para calcular las pérdidas. Del mismo modo, estos modelos no tienen en cuenta fenómenos importantes en la transmisión por radio como son la reflexión, refracción y difracción. Por el contrario, los valores obtenidos mediante la simulación de locales con el código

de *Ray Launching* apropiado se aproximan bastante a las mediciones del local, ya que, entre otras cuestiones, tiene en cuenta la componente multitrayecto de la radiopropagación, aunque dispone de un cierto error, debido principalmente a las limitaciones del algoritmo, ya que no es capaz de implementar con suficiente exactitud y fluidez fenómenos importantes en la propagación *indoor*, como son la difracción y el *scattering*.

Gracias a la realización de este trabajo, se han logrado comprender aspectos técnicos que no se sabía que existían de la tecnología inalámbrica femtocelular, así como aspectos relevantes de las redes de cuarta generación LTE.

5.2. Líneas Futuras

En el transcurso de la elaboración de este proyecto, se han podido localizar nuevas investigaciones relacionadas con este tema. Es oportuno proponer una serie de líneas futuras que podrían seguirse una vez finalizado el proyecto.

- Realizar las pruebas prácticas presentadas en este proyecto, pero bajo la influencia de recintos que dispongan de otras características; por ejemplo, túneles, locales de uso sanitario, hoteles, estudios de grabación, fábricas, canalizaciones subterráneas, etc., todos ellos de características claramente diferenciadas.
- Utilización de nodos femtocelulares reales para comprobar su funcionamiento real.
- Como la principal aplicación de las femtoceldas es mejorar la cobertura y calidad de la red en interiores sería recomendable, una vez construido el edificio, comprobar el funcionamiento de una estación real en el edificio simulado para MLMR Arquitectos Asociados, analizando posteriormente su comportamiento.
- Realización de una comparativa detallada entre dispositivos femtocelulares 2G, 3G y Femtoceldas LTE.
- Estudio experimental de las interferencias entre dispositivos femtocelulares, Wi-Fi, UMTS y HSDPA, GSM, Bluetooth, Zigbee, etc.

5.3. Glosario

2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
3GPP	3 rd Partnership Project
AM	Amplitude Modulation
ASK	Amplitude Shift Keying
AF	Audio Frequency
ALE	Application Level Events
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASK	Amplitude Shift Keying
Auto-ID	Auto Identification
CN	Core Network
COST	Cooperation in Science and Technology
CR	Cognitive Radio
CRC	Cyclic Redundancy Check
DSB	SC Double Side Band-Supressed Carrier
EAS	Electronic Article Surveillance
EED	Earliest Due Date
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Code
eUTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVDO	Evolution-Data Only
FIFO	First In, First Out
FCC	Federal Communication Commision
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
FDD	Frequency-Division Duplexing
GTIN	Global Trade Item Number
GSM	Global System for Movile COmmunications
GPRS	General Packet Radio Service
HF	High Frequency
HnB	Home Node B
HnB-GW	Home Node B Gateway
HeNB	Home evolved Node B
HNBPA	Home Node B Application Part
HSDPA	High- Speed Downlink Packet Access
IFF	Identification Friend o For
IPR	Intellectual Property Rights
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Union Telecommunication
ITU-R	International Union Telecommunication Radio Communication sector
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LF	Low Frequency
LRC	Longitudinal Redundancy Check
LTE	Long Term Evolution

LTEA	Long Term Evolution Advanced
MP3	MPEG-1 Audio Layer 3
MSK	Minimum Shift Keying
MPEG	Moving Picture Experts Group
MF	Medium Frequency
OFDM	Orthogonal frequency Division Multiplexing
ONS	Object Name Server
OOK	On Off Keying
PSK	Phase Shift Keying
PC	Protocol Control
PCI	Physical Cell Identity
PSK	Phase Shift Keying
PM	Phase Modulation
PTP	Precision Timing Protocol
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frecuencia
RFID	Radio Frequency IDentification
RKRL	Radio Knowledge Representation Language
RPT	Remaining Production Time
SAW	Surface Acoustic Wave
SCM	Supply Chain Management
SDR	Software Designed Radio
SeGW	Security Gateway
SEP	Smart End Point
SIM	Subscriber Identity Module
S-MME	Mobile Management Entity
SNR	Signal Noise Ratio
SRT	Shorter Remaining Production Time
SSB	Single Side Band
TDD	Time Division duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEM	Transverse Electro Magnetic
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UE	User Equipment
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
VHF	Very High Frequency
VSF	Vestigial Side Band
Vpp	Voltios pico pico
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

5.4. Referencias

- [1] Jose Maria Hernando Rabanos, "Transmisión *por radio*", Editorial Universitaria Ramos Areces, 2008
- [2] <http://www.eveliux.com/mx/tipos-de-propagacion.php>
- [3] Tapan K. Sarkar, Zhong Ji, Kyungjung Kim, Abdellatif Medouri and MAgdalena Salazar-Palma. "A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication", IEEE Antenas and Propagation Magazine, Vol. 45, N°.3, Junio del 2003
- [4] Jie Zhang, Guillaume de la Roche "Femtocells, Technologies and Deployment", Editorial Wilwy, diciembre de 2009
- [5] Verizon Wireless, "1xEV-DO Rev. A Technology", 2009.
- [6] I. Poole, "Cellular Communications Explained. From Basics to 3G"., 2006.
- [7] "3GPP/LTE", 2012. <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [8] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, "LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles," Fundación Vodafone España, 2010.
- [9] H. Holma y T. Antti, "LTE for UMTS - OFDMA and SCFDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [10] J. Mitola III, "Software radios-survey, critical evaluation and future directions", Telesystems Conference, pp. 13--15, May. 1992.
- [11] R.I. Lackey, D. W. Upmal, "SpeakEasy:The Military Software Radio", IEEE Communications Magazine, Vol. 33, New York, pp. 5-6-61, May. 1995.
- [13] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [14] IEEE 1900.1 Group, Draft Document, "Standard Definitions and Concepts for Spectrum Management and Advanced Radio System Technologies", Jun. 2006.
- [15] FCC, "Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies" ET Docket No. 03 108, Dec. 2003.

[16] J. Neel, R. Gilles, “*The Role of the Game Theory in the Analysis of Software Radio Networks*”, Proc. Software Defined radio Forum Technical Conference and Product Exhibition (SDR’02), vol. 2, pp. NP-3-02, San Diego, California, USA, Nov. 2002.

[17] <http://www.smallcellforum.org/>

[18] Lauren Town, Jean-Pierre Combe, “*Coverage propositions for Orange Customers*”, FemtoZone Mobile World Congress., Barcelona 2012

[19] Vikran Chandrasekhar, Jeffrey G. Andrews, “*Femtocell Networks: A survey*”, Iee Communications MAgacine, Spt 2008

[20] Ramón Agusti Cornes, F. Bernardo Álvarez, Fernando Casadevall, R. Ferrús, Oriol Sallent, Jordi Pérez Romero: “*LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*” Fundacion Vodafone España, 2100

[21] Informa Telecoms & Media, “*Mobile Broadband Access at Home*”, 2009.

[22] S. Rangan, “*Femto-Macro Cellular Interference Control with Subband Scheduling and Interference Cancellation*,” Arxiv preprint arXiv:1007.0507, 2010.

[23] S. Ruth “*Green IT - More than a three percent solution?*” IEEE Internet Comput., vol. 13, no 4, Julio 2009

[24] H. Claussen. T. W. Lester, F. Pivit, “*Leveraging advances in mobile broadband technology to improve environmental sustainability*”, Telecommun. J. of Australia, vol. 59, 2009

[25] Máximo Morales Céspedes, PFC: “*Gestión de Interferencias en Sistemas Femtocelda*”, 2100

[26] Marta Anaya de Paz: PFC “*Femtoceldas de UMTS*”, 2011

[27] R. Baines, “*Femtocells Broadening Applications, Broadening standards. The need for Femtocells, from 3G to 4G.*” de Femtozone Mobile World Congress, Barcelona, 2009.

ANEXO 1

Complementos Teóricos

A.1. Introducción a los sistemas MIMO

Los sistemas de comunicaciones con múltiples antenas o sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), han generado en la última década un gran interés de la comunidad investigadora. Inicialmente propuestos para enlaces punto a punto entre un transmisor y un receptor, estos sistemas se perfilan como una posible solución tecnológica para los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricas o celulares, debido a la alta eficiencia espectral que presentan bajo determinadas condiciones [19],[22].

En grandes líneas, un sistema MIMO punto a punto o *single-user* se define como un enlace donde tanto el transmisor, que podría ser una estación base o un *access point*, como el receptor, que sería el usuario móvil o inalámbrico, disponen de varias antenas y por tanto es posible combinar de alguna forma las múltiples muestras en transmisión y recepción. De esta forma se introduce una dimensión espacial en el procesado de señal asociado, que pasa a ser espacio-temporal. Los canales MIMO son una representación matemática bastante adecuada de diversos sistemas de comunicaciones. Este Anexo va a mostrar las distintas configuraciones de sistemas MIMO, empezando con la configuración básica punto a punto y terminando con la configuración más avanzada, el sistema MIMO multiusuario multi-celda. La figura A.1 muestra esta evolución:

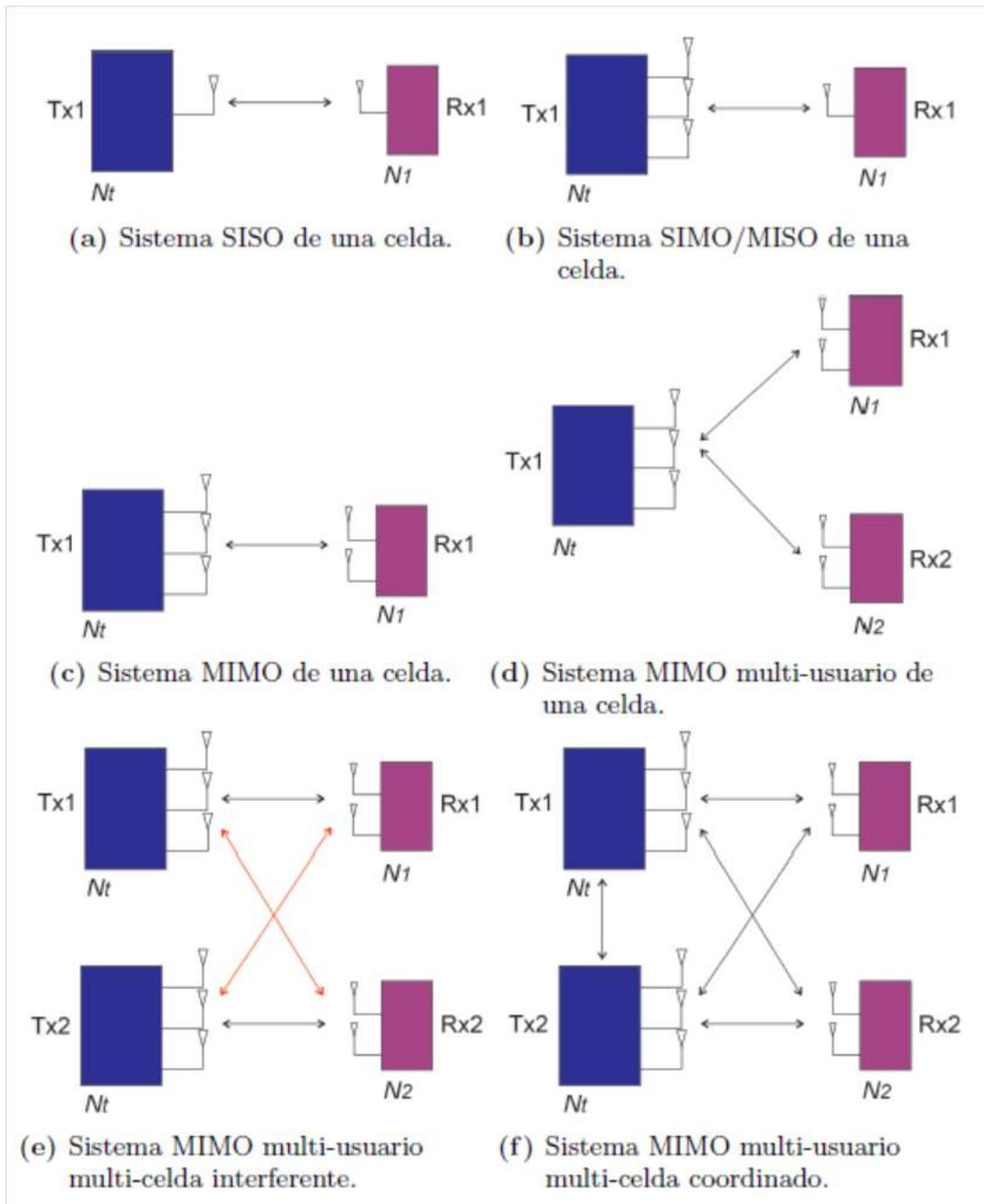


Figura A.1: Evolución de los sistemas MIMO

A.1.1. Sistemas SISO, SIMO y MISO

Un sistema SISO (*Single-Input Single-Output*) es un enlace donde el transmisor y el receptor disponen de una sola antena. La capacidad de estos sistemas en (bit/seg./Hz) viene dada por [18]:

$$C = \log_2\{1 + \rho|h|^2\}$$

Donde:

- h : es el canal normalizado entre las dos antenas
- ρ : es la relación señal a ruido (*SNR, Signal-to-Noise Ratio*) en la antena receptora.

Cuando el transmisor o el receptor disponen de N_t o N_r antenas, respectivamente, aparecen los sistemas MISO (*Multiple-Input Single-Output*) o SIMO (*Single-Input Multiple-Output*). La tecnología de antenas inteligentes o smart antennas, considerada la precursora de los sistemas MIMO, también se incluye dentro de los sistemas SIMO o MISO. En esta tecnología, se utilizaban arrays de antenas para mejorar las prestaciones de los sistemas inalámbricos (cobertura, calidad del enlace o capacidad) en presencia de interferencias o efectos adversos de propagación.

Básicamente, la tecnología de antenas inteligentes utilizaba dos técnicas, la conformación de haz o *beamforming* y la diversidad espacial.

Beamforming: Un *beamformer* es un filtro espacial que opera sobre las salidas de un array de antenas, con el objetivo de estimar la señal procedente de una determinada dirección deseada en presencia de ruido e interferencias. El *beamformer* separa, mediante filtrado espacial, señales que se superponen en frecuencia pero que tienen fuentes espaciales distintas.

Los criterios típicos a la hora de diseñar un *beamformer* se basan en optimizar la señal a la salida del array con respecto a un criterio determinado, que puede ser potencia máxima, máxima SNR, mínima interferencia o máxima relación señal a ruido más interferencias (*SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*).

Físicamente, un *beamformer* está formado por un conjunto de pesos, que se encargan de modificar en módulo y fase las componentes de señal recibidas que se corresponden con la fuente en cuya dirección se quiere apuntar el haz principal, con el objetivo de sumarlas en fase. El número de antenas del array determina los cambios permitidos al diagrama de radiación.

En el caso de un *beamformer* funcionando en recepción (sistema SIMO), cuando el array de Nr antenas es uniforme y lineal, la señal a la salida de las antenas y antes del *beamformer* podría expresarse como un vector de Nr muestras:

$$x = vs + n$$

Donde:

- s : es la señal transmitida por una fuente.
- n : es el ruido introducido por el array
- v : es el *steering* vector o respuesta del array.

$$v = \left[1 \quad e^{-j2\pi\sin(\theta)\frac{d}{\lambda}} \quad \dots \quad e^{-j2\pi\sin(\theta)\frac{(M-1)d}{\lambda}} \right]^T$$

Donde:

- d : representa el espaciado entre antenas
- λ : es la longitud de onda
- θ : es el ángulo de incidencia del frente de ondas con respecto a la perpendicular al array.

Tras pasar por el *beamformer*, la señal recibida quedaría:

$$y = w^H x$$

Donde w representa el vector de pesos del *beamformer*.

En un sistema SIMO, un *beamformer* de Nr antenas puede aumentar en un factor Nr la SNR de una fuente (ganancia de array o beamforming), puede extraer una fuente y cancelar $Nr - 1$ simultáneamente, o bien puede extraer Nr fuentes simultáneamente, suponiendo que las restantes $Nr - 1$ son interferentes, mediante el diseño y superposición de *beamformers* diseñados específicamente para cada usuario.

Diversidad espacial. Esta técnica se basa en el hecho de que en un entorno con propagación multi-camino, una misma señal que llega a ubicaciones distintas

sufre desvanecimientos incorrelados. De esta forma la probabilidad de detectar un desvanecimiento del canal disminuye si se dispone de varias antenas en transmisión o recepción, obteniendo así una ganancia por diversidad.

En un sistema SIMO, el receptor puede estimar el canal mediante secuencias de entrenamiento, dando lugar a distintas técnicas de diversidad espacial en recepción. Las técnicas óptimas de diversidad espacial en recepción se dividen en lineales y no lineales. Dentro de las técnicas óptimas lineales, se encuentra la combinación MRC (*Maximum Ratio Combining*), que trata de maximizar la SNR y la combinación MMSE (*Minimum Mean Square Error*), [17] que minimiza el error cuadrático medio. Dentro de las técnicas óptimas no lineales se encuentra la combinación ML (*Maximum Likelihood*).

Las técnicas subóptimas más comunes son la combinación EGC (*Equal Gain Combining*), donde las señales se ajustan en fase y simplemente se suman, y la selección de antena o *switching*, donde se selecciona la salida de una antena según un criterio determinado (potencia de señal deseada, potencia total o SNR en cada antena). Esta última técnica es la más sencilla de implementar.

Por otro lado, los sistemas MISO necesitan conocer de alguna forma el canal para poder implementar técnicas de *beamforming*. Cuando no se dispone de un conocimiento perfecto o parcial del canal, las técnicas más utilizadas son las de diversidad espacial en transmisión, que se comentarán en el siguiente punto de sistemas single-user MIMO. En un sistema SIMO con N_r antenas en recepción, la capacidad en (bit/seg./Hz) se modifica:

$$C = \log_2 \left\{ 1 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} |h_i|^2 \right\}$$

Donde h_i es el canal para la antena receptora i . Analizando la expresión anterior, se observa que aumentar el número de antenas receptoras sólo produce un aumento logarítmico de la capacidad media.

En el caso de un sistema MISO con N_t antenas transmisoras, cuando no se dispone de conocimiento de canal en transmisión y se opta por un esquema de diversidad espacial, la capacidad en (bit/seg./Hz) se expresa:

$$C = \log_2 \left\{ 1 + \frac{\rho}{Nt} \sum_{i=1}^{Nt} |h_i|^2 \right\}$$

El hecho de dividir la SNR por Nt asegura que la potencia total transmitida es fija. De la expresión anterior se deduce que se pierde la ganancia de array y que la capacidad mantiene una relación logarítmica con Nt .

A.1.2. Sistemas single-user MIMO

Siguiendo la figura A.1, la siguiente configuración en la evolución de los sistemas MIMO es la de un sistema single-user MIMO, donde un transmisor equipado con Nt antenas se comunica con un único receptor que dispone de Nr antenas. La idea fundamental es la de explotar la dimensión espacial que introducen las múltiples antenas en transmisión y recepción.

En un sistema MIMO, el canal pasa a ser una matriz. En los sistemas SIMO y MISO, determinadas técnicas de *beamforming* mejoran sus prestaciones en entornos LOS (*Line of Sight*) de propagación [18], mientras que algunas técnicas de diversidad espacial mejoran en condiciones NLOS (*Non-Line of Sight*) de propagación. La diferencia fundamental de los sistemas MIMO con respecto a los sistemas SIMO o MISO es que ahora, se aprovecha la propagación multi-camino en lugar de mitigarla, mediante la técnica de multiplexado espacial.

La técnica de multiplexado espacial permite mandar señales independientes de forma simultánea sobre el canal MIMO. Esto es debido a que en un escenario con propagación multi-camino, el canal MIMO puede ser espacialmente selectivo y los distintos canales entre antenas transmisoras y receptoras pueden ser incorrelados entre sí. Aunque actualmente los sistemas soportan múltiples usuarios, los resultados de los sistemas de un único usuario siguen siendo interesantes puesto que la forma más habitual de analizar un sistema MIMO multi-usuario es reducirlo a un sistema de un único usuario, asignando a los usuarios recursos ortogonales en tiempo, espacio, frecuencia o código.

A.1.3 Sistemas MIMO multi-usuario

Los antecedentes de estos sistemas se encuentran también en la tecnología de antenas inteligentes, donde un array de antenas permitía, mediante SDMA (*Spatial Division Multiple Access*), comunicarse con múltiples usuarios que estaban separados únicamente por su firma espacial.

La configuración básica de un sistema MIMO multi-usuario (ver figura A.1), comprende un transmisor (estación base o *access point*) equipado con N_t antenas que se comunica con M usuarios, que disponen de múltiples antenas en recepción.

Un sistema MIMO multi-usuario también puede interpretarse como un sistema single-user MIMO donde las N_r antenas receptoras se distribuyen espacialmente en M usuarios, cada uno con N_m antenas disponibles, de forma que $N_r = \sum m N_m$. [20]. Las N_m antenas de cada usuario permiten mitigar la interferencia entre usuarios y aumentan los grados de libertad disponibles para separarlos espacialmente.

Sin embargo, existen diferencias esenciales entre los sistemas *single-user* MIMO y los MIMO multi-usuario. El hecho de distribuir espacialmente las N_r antenas receptoras, implica que no sea posible coordinar las muestras que reciben los distintos usuarios. Al mismo tiempo, aparecen múltiples restricciones de potencia, una por usuario.

Las ventajas de los sistemas MIMO multi-usuario comprenden [18], entre otras, una mayor robustez frente a limitaciones como el condicionamiento de la matriz de canal, o la posibilidad de utilizar la técnica de multiplexado espacial incluso si los usuarios disponen de una única antena, con lo que el coste de diseño de los receptores puede reducirse.

ANEXO 2

Publicaciones en Congresos

2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting Technical Program

		Monday	
		Morning	Afternoon
C	Chicago VI	101 Applications of Numerical Methods	151 Fast Solution, Model Reduction, and Domain Decomposition for Finite Element Analysis
C	Chicago VII	102 Millimeter-Wave Antennas	152 THz Sources, Systems, and Applications
C	Chicago VIII		153 Electrodynamics and Applications of Carbon Nanotube and Graphene Systems
C	Chicago IX		154 The Legacy of Harold A. Wheeler
C	Chicago X	103 Globalization of Engineering Education: Perspectives and Panel Discussion	155 Beamforming, Nulling, and Direction of Arrival Estimation
H	Illinois	104 Magnetic Resonance Imaging	156 Biomedical Systems
M	Michigan A	105 Electronic Devices, Circuits, and Applications I	157 Microstrip antennas
M	Michigan B	106 Radar Systems, Target Phenomenology and Processing	158 Modeling for Wireless Propagation Channels
			166 Wireless Communications and Propagation Effects
S	Superior A	107 High Frequency Techniques	159 High Frequency and Asymptotic Methods
S	Superior B	108 Ionospheric Modeling and Propagation	160 Antenna Theory
C	Colorado	109 Adaptive and Wideband Arrays	161 Multiband Antennas
			167 Microwave Lens Antennas
M	Missouri	110 Diagnostic and Therapeutic Applications of Hyperthermia	162 Parallel and Special-Processor Based Numerical Methods
P	Portland C	111 Vehicular Antennas	163 Antenna Measurements and Measurement Systems
M	Mississippi	112 Arrays for Cognitive Networking	164 Radio Communication Systems
O	Ohio	113 Electromagnetic Effects of Materials	165 Integral Equation Solvers for Large and Multi-Scale Problems
R		IF11 Impedance Matching and Decoupling for MIMO Systems	

iver Exhibition Hall B		IF12 Fields and Waves in Metamaterials - Part I IF13 Fields and Waves in Metamaterials - Part II IF14 Metamaterials and Metastructures IF15 Small Antennas: Wideband, Multiband, High-Frequency and On-Body Applications IF16 Remote Sensing, Imaging, and Inverse Scattering
------------------------------	--	--

164 Radio Communication Systems

Monday, July 9 13:20-17:00 Mississippi (AP-S/URSI)

Session Chairs: Trevor Bird, Inder Gupta

13:20 164.1 Software Defined Payloads: a European Perspective

P. Angeletti

European Space Agency, Noordwijk, Netherlands

13:40 164.2 A Hybrid Wireless Positioning System

K. C. Guo¹, Y. J. Guo², X. Huang², E. Dutkiewicz¹

¹*Dept. of electronic Engineering, Macquarie University, Sydney, NSW, Australia*

²*ICT Centre, CSIRO, Sydney, NSW, Australia*

14:00 164.3 New Method Based on RSSI for Passive UHF RFID Localization System

Y. Duroc, G. Andia Vera

Polytechnic National Institute of Grenoble, LCIS, Valence, France

14:20 164.4 Impact of Morphology in the Estimation of Power Delay Profiles in Future Indoor Femtocell Scenarios

A. Satostegui, S. Larripa, L. Azpilicueta, F. Falcone

EE Dept., Universidad Publica de Navarra, Pamplona, Spain

14:40 164.5 Estimation of Wireless Coverage for Utilities in Complex Tunnel Environments

S. Larripa, A. Satostegui, L. Azpilicueta, F. Falcone

EE Dept., Universidad Publica de Navarra, Pamplona, Spain

15:00 Break

15:20 164.6 Total Radiated Power of Wireless Devices in a Dielectrically Loaded Reverberation Chamber

W. F. Young, C. Dunlap, J. Ladbury

Electromagnetics Division, The National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, United States

15:40 164.7 Introduction to Reconfigurable Sensing Antennas

F. Yang^{1,2}, Q. Qiao², Z. Jiang¹, A. Elsherbeni²

¹*Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China*

²*Electrical Engineering Department, The University of Mississippi, Oxford, MS, USA*

16:00 164.8 TCM-4D Decoder Implementation for 64 and 128-QAM in Limited Logic Area

E. Murat, A. Eksim, S. Kahraman, M. S. Sağıroğlu

TUBITAK-BILGEM, Kocaeli, Turkey

16:20 164.9 Traffic Load Balancing and Efficient Carrier Utilization in Cellular Radio Communication Networks

O. W. Ata

Electrical and Computer engineering, Palestine Polytechnic University, Hebron, West Bank, via Israel

16:40 164.10 A Novel Approach to Realize Flat Gain Response in Beam-Switching Array

H. Wang¹, X. Ruan², Z. Zhang¹, Z. Feng¹

¹*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China*

²*Institute of Chinese Electronic Equipment System Engineering Corporation, Beijing, China*

Impact of Morphology in the Estimation of Power Delay Profiles in Future Indoor Femtocell Scenarios

Aitor Satóstegui, Sergio Larripa, Leire Azpilicueta, Francisco Falcone
(1) Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

The adoption of high capacity fourth generation wireless networks will be reality in the near future. The implementation of R (through R10 standard of 3GPP) is leading to the framework of Long Term Evolution (LTE) networks. One of the main features of LTE is very high capacity wireless links, usually indoor quasi-static scenarios, served by individual femtocells. Wireless channels in heterogeneous systems (combined with native fourth generation networks, as well as pre-existent WLAN and WBAN networks), due to the complexity of the topology and morphology suffer from strong multipath fading, leading to capacity loss and quality of service degradation, which are strongly related with the indoor scenario itself. In this work, a deterministic 3D ray launching in house code has been employed in order to perform precise radio planning at different LTE-based frequencies, spanning from 900MHz to 2600MHz. The simulation scenario consists in a typical office environment, in which the topological detail has been considered, by introducing furniture and auxiliary elements (see Figure 1). Material properties (in term of dielectric constant as well as loss tangent for frequencies of operation) have been introduced in order to obtain realistic results. The values of received power levels suffer strong variation as a function of position, as well as estimation of power delay profiles, as shown in Figure 2. These results can aid, by careful consideration of the proper characteristics of the scenario in radio planning analysis of future heterogeneous indoor wireless systems, to obtain capacity increase and quality of service (by inherent interference reduction) and reduction in overall power consumption.

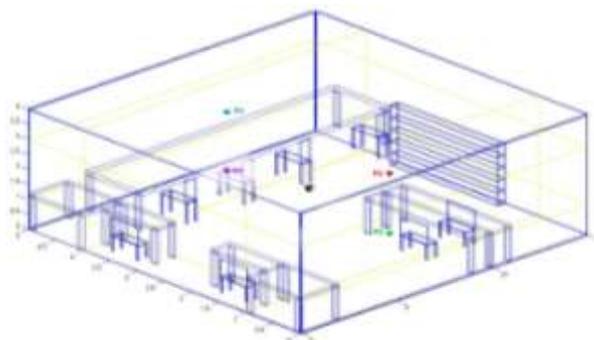


Figure 1: Indoor Simulation Scenario

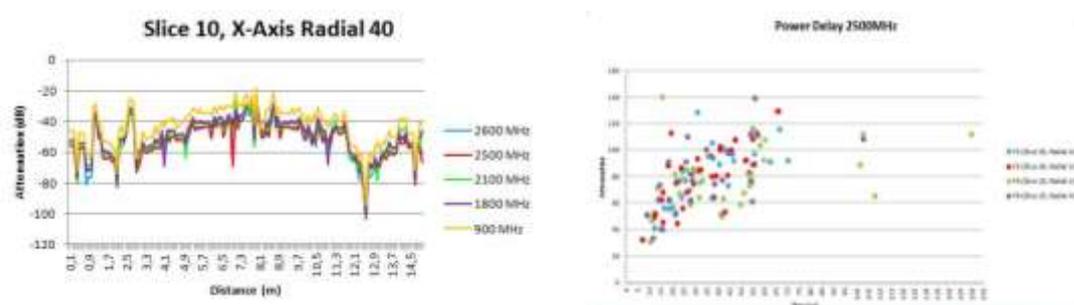


Figure 2: Estimation of received power level at different positions within the scenario (left), estimation of power delay profile as a function of position within the scenario (right).

Estimation of Wireless Coverage for Utilities in Complex Tunnel Environment

Sergio Larripa, Aitor Satóstegui, Leire Azpilicueta, Francisco Falcone
(1) Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

The use of wireless systems in tunnels has increased, due to the larger number of utilities that can nowadays be placed underground. This is very convenient in terms of urban planning, however great care has to be taken in order to guarantee the safety of workers and operators of such utilities. A straightforward approach is to implement wireless communication system, such a private trunking, mobile phone or WLAN systems means of distributed antenna systems, radio over fiber or radiating cable, among others. The main challenge in the particular case of underground urban tunnels for utilities is the complex geometry (trays for cables, different pipelines, walking platforms and rails, etc.) as well as the waveguide-like configuration given by the geometry of the tunnel itself. In this work, an in house 3D ray launching algorithm as well as dielectric waveguide model signal for a mobile phone system in the 900MHz frequency band, within a real model of underground tunnel for utilities in Pamplona (Figure 1). Due to the strong multipath effects within the particular tunnel environment under analysis, the best fitting for 3D ray launching is given in the proximity of the transmitter, whereas the dielectric waveguide model is more precise in the far field approximation, due to extinction of previous scattered components, as can be seen in Figure 2. The adequate combination of both techniques can provide a valuable tool for optimized radioplanning in such complex indoor tunnel environments.

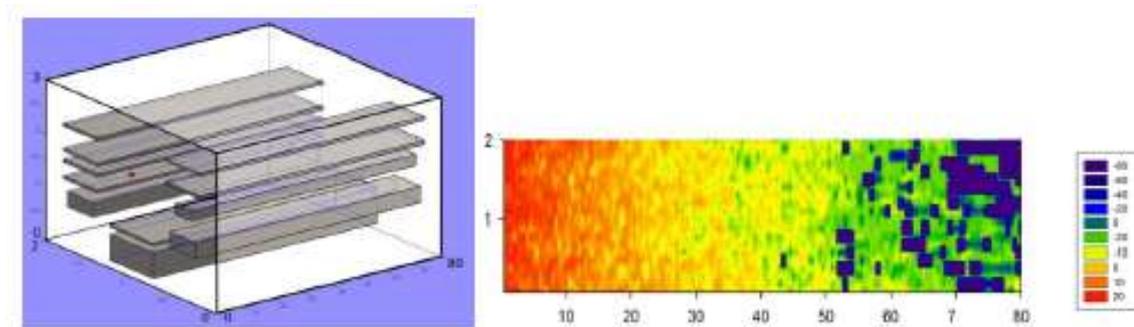


Figure 1: Schematic of the tunnel layout that has been simulated and estimated received power for a mind-height cut plane of the tunnel.

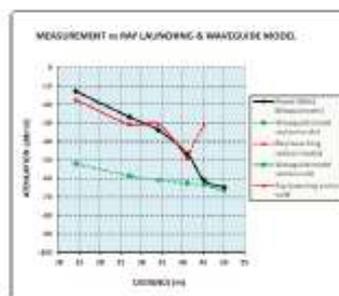


Figure 2: Comparison of estimated power levels by 3D ray launching, dielectric waveguide model and measurement results

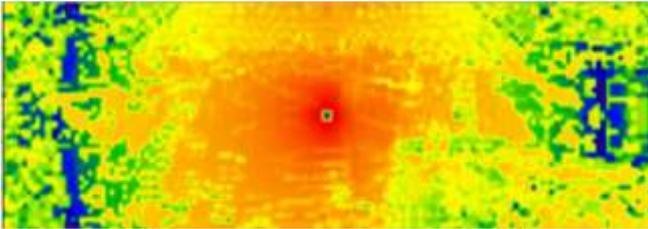
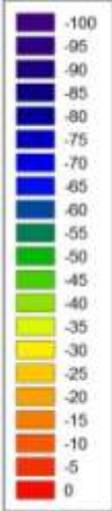
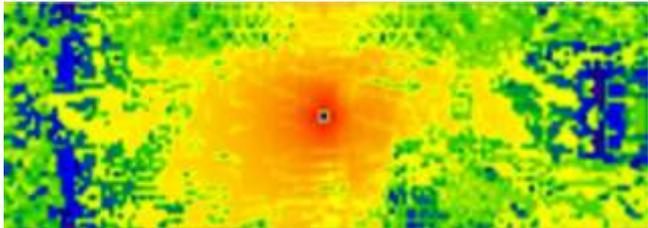
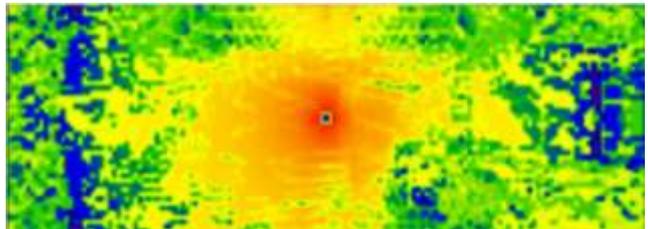
ANEXO 3

Medidas y Resultados Adicionales

A.3.1. Escenario 1: Jerónimo de Ayanz

Como se está comentado en la memoria del proyecto, el primer paso para acercarnos al objetivo es comprender como varían el resultado todas las variables de la simulación. En el apartado de la memoria se mostraron los resultados de este escenario para las frecuencias de 900 MHz y 2500 MHz. Aquí se van a mostrar los resultados obtenidos con las simulaciones a otras frecuencias, correspondientes a bandas frecuenciales utilizadas por los diversos tipos de tecnología inalámbrica. La antena, al igual que antes está colocada en el centro de la sala.

Para no crear confusión, se van a presentar únicamente los resultados obtenidos para un corte de la sala a la altura de la antena, es decir a 1.5 metros.

Frecuencia de emisión	Potencia recibida (dBm)	Escala (dBm)
900 MHz		
1800 MHz		
2100 MHz		

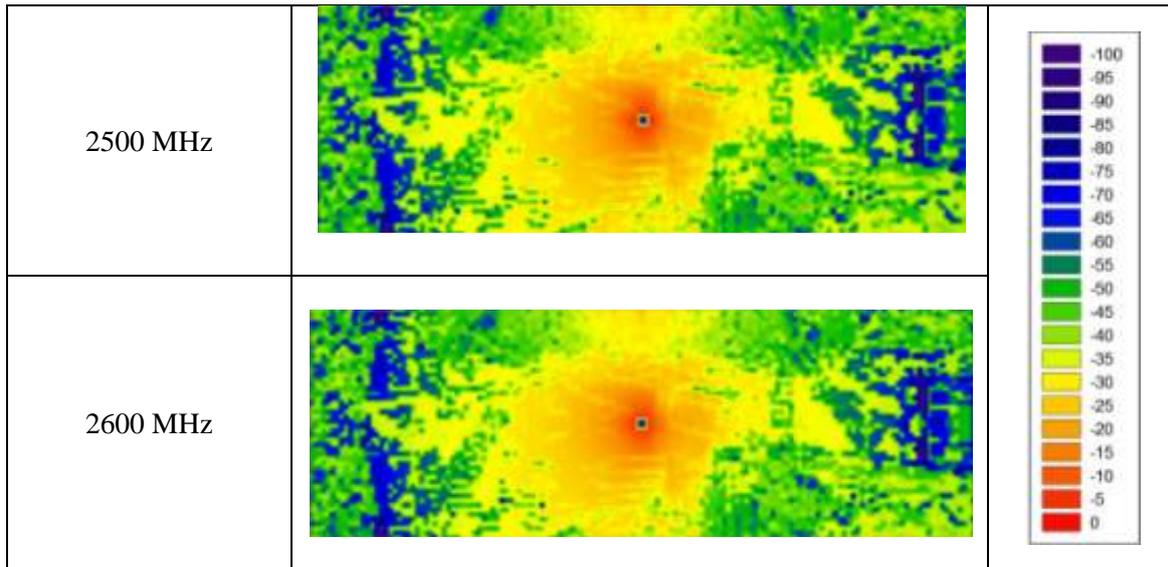


Tabla A3.1: Potencia recibida JdA con antena central para todas las frecuencias simuladas

A simple vista se puede observar como conforme aumenta la frecuencia se obtienen valores más pequeños. El cambio más apreciable está entre los 900MHz y los 1800MHz, porque aquí el salto es mayor.

A.3.2. Diferentes materiales en la pared

Se van a completar las simulaciones con paredes de cemento y metal realizadas. Los resultados al igual que los que aparecen en el desarrollo de la memoria están obtenidos para una frecuencia de 900 MHz

Pared de cemento-metal en 3 columnas, tipo A

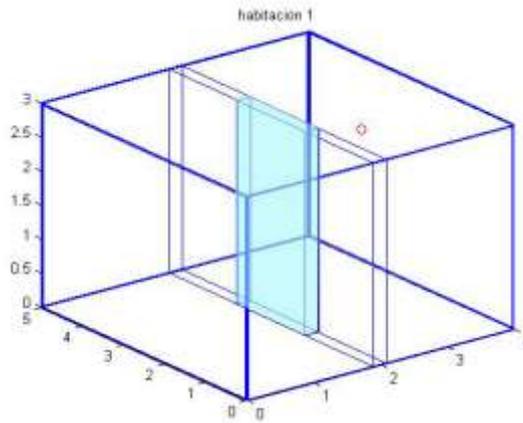


Figura A3.1: Escenario con la pared central de cemento y metal en 3 columnas, tipo A

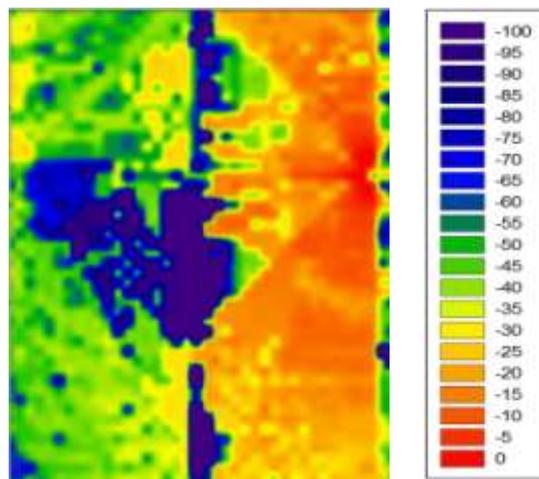


Figura A3.2: Potencia recibida con pared de cemento y metal en 3 columnas, tipo A

Pared de cemento-metal en 3 columnas, tipo B

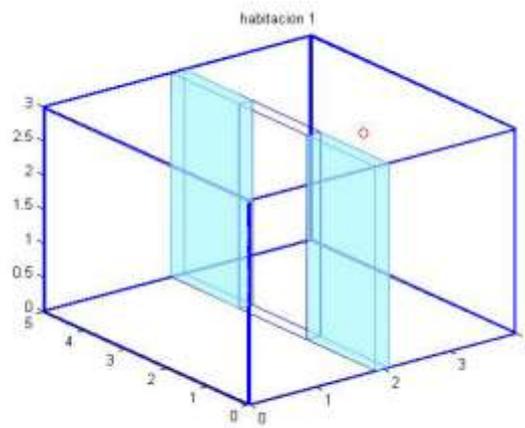


Figura A3.3: Escenario con la pared central de cemento y metal en 3 columnas, tipo B

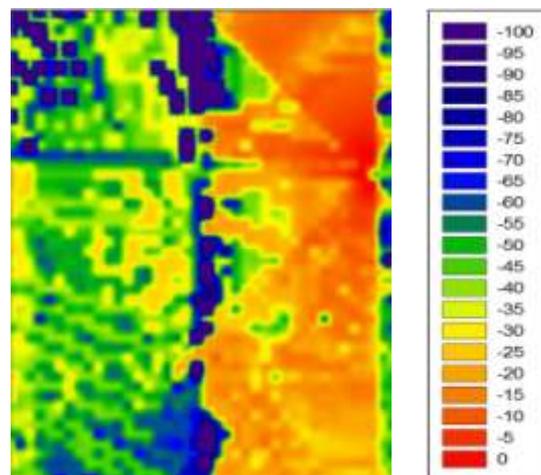


Figura A3.4: Potencia recibida con pared de cemento y metal en 3 columnas, tipo B

Pared de cemento-metal en varias columnas, tipo A

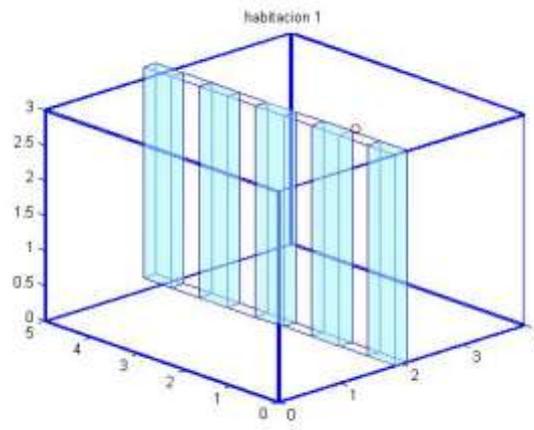


Figura A3.5: Escenario con la pared central de cemento y metal en varias columnas, tipo A

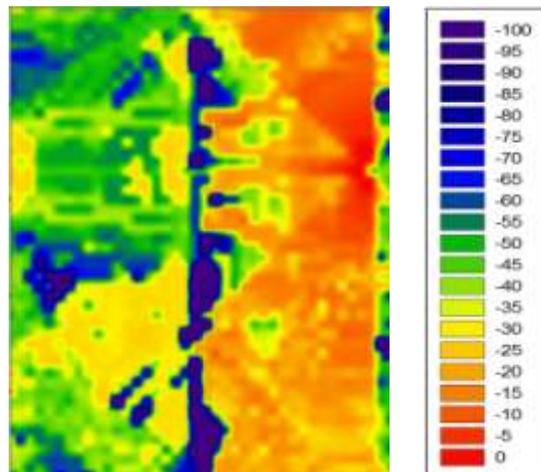


Figura A3.6: Potencia recibida con pared de cemento y metal en varias columnas, tipo A

Pared de cemento-metal en varias columnas, tipo B

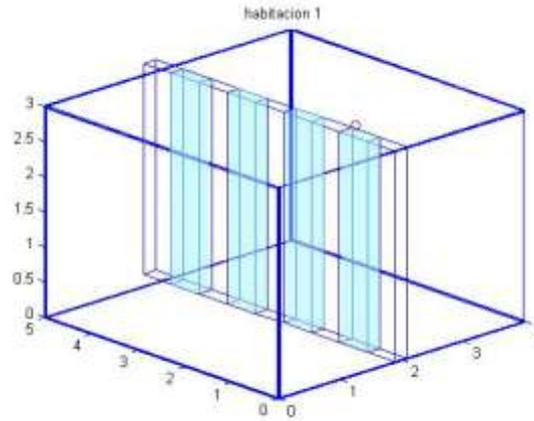


Figura A3.7: Escenario con la pared central de cemento y metal en varias columnas, tipo B

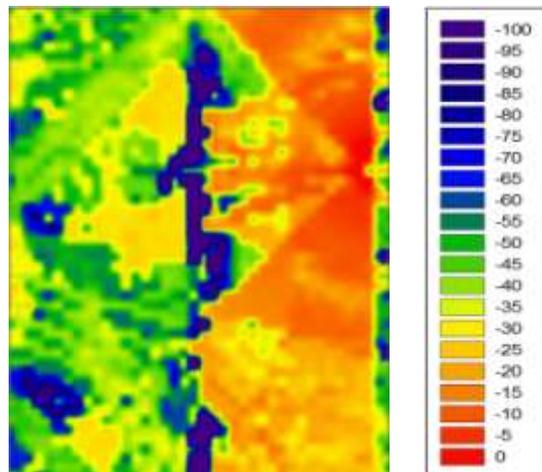


Figura A3.8: Potencia recibida con pared de cemento y metal en varias columnas, tipo B

A.3.3. Proyecto MLMR

Resultados de las simulaciones en el edificio MLMR de Potencia recibida. Las frecuencias aquí mostradas serán las de 2100 MHz y 2500 MHz, ya que las de 900 MHz han sido explicadas en la memoria

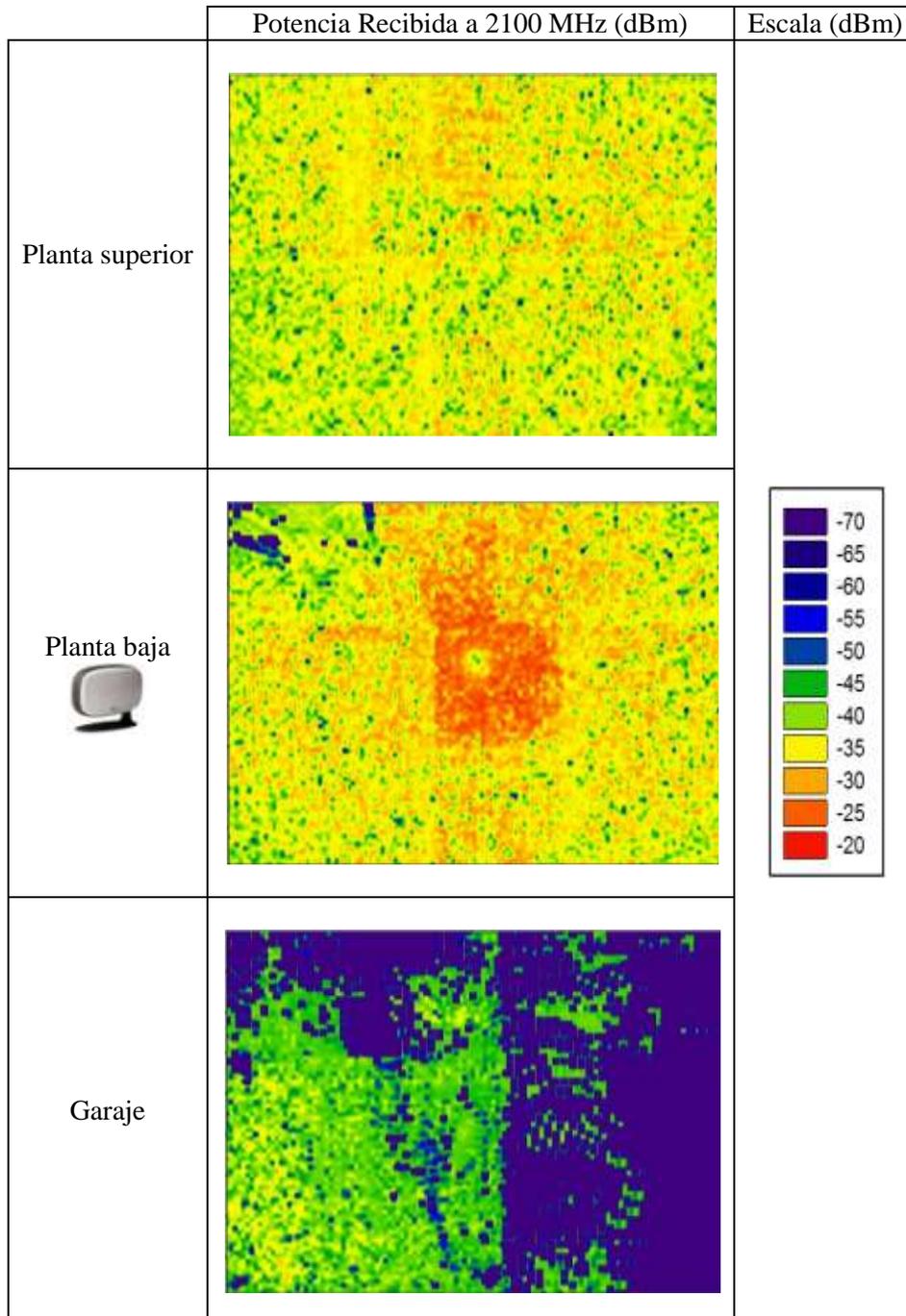


Tabla A3.2: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja a 2100 MHz

Potencia Recibida a 2500 MHz (dBm)	Escala (dBm)
------------------------------------	--------------

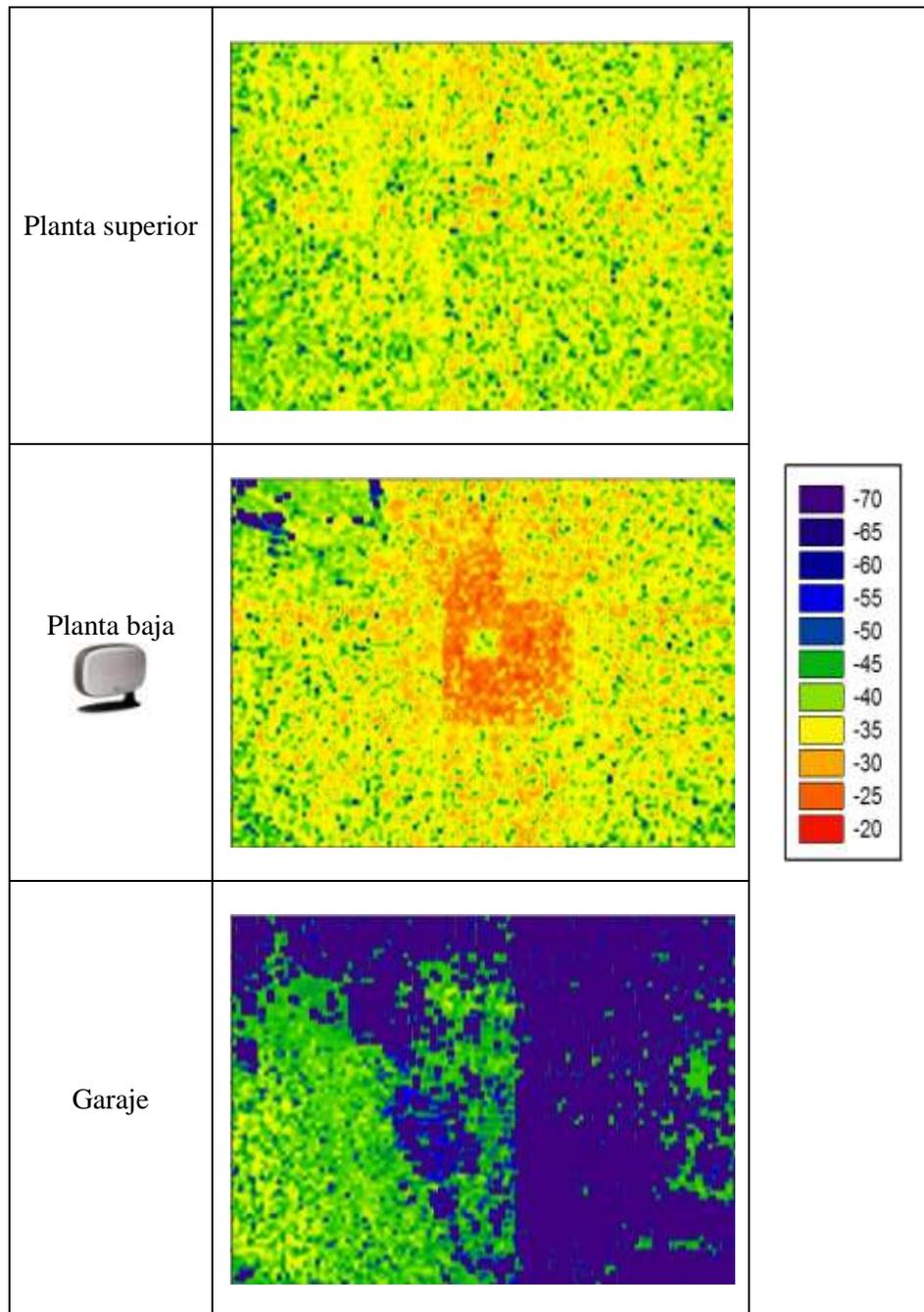


Tabla A3.3: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta baja a 2500 MHz

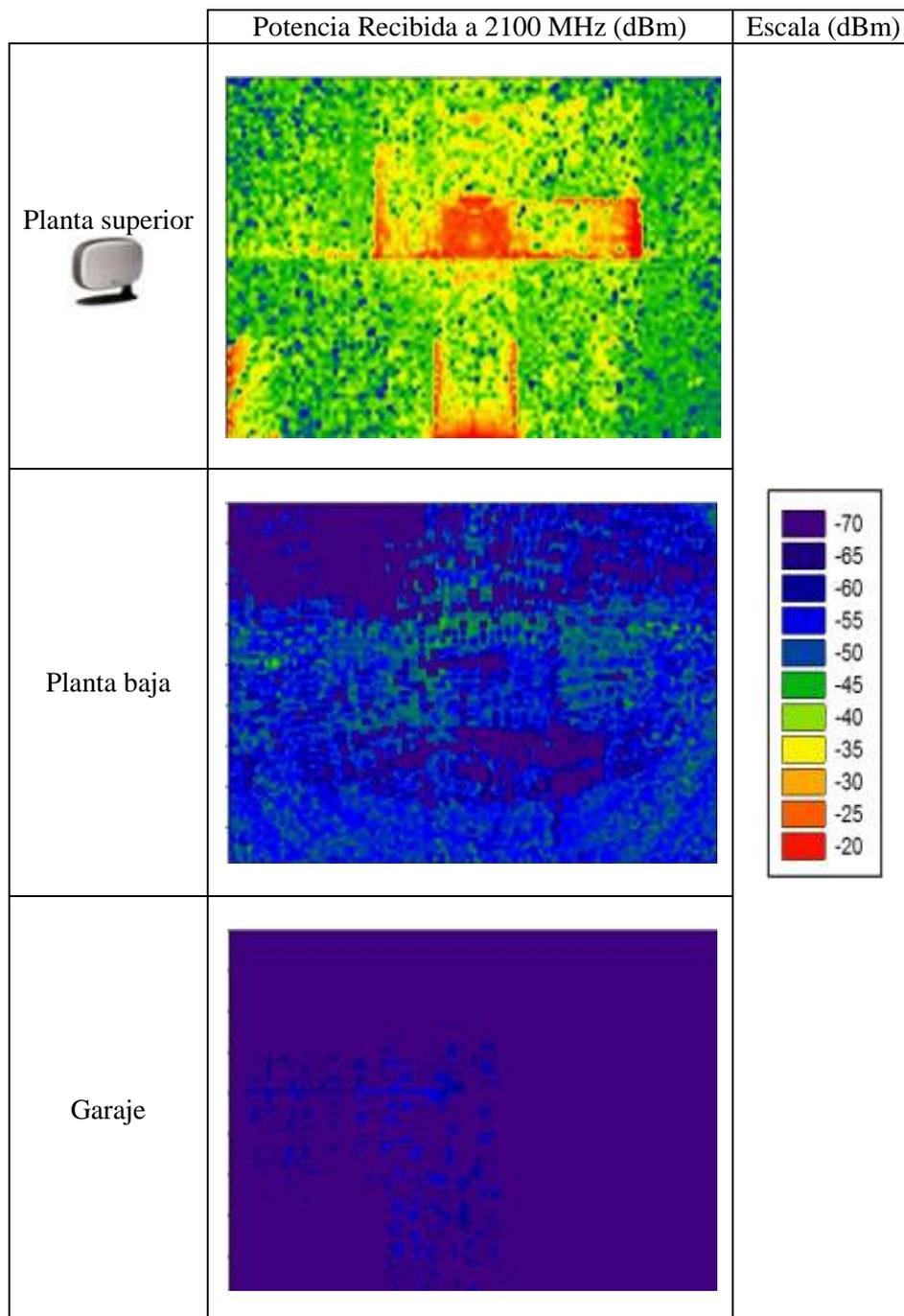


Tabla A3.4: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior a 2100 MHz

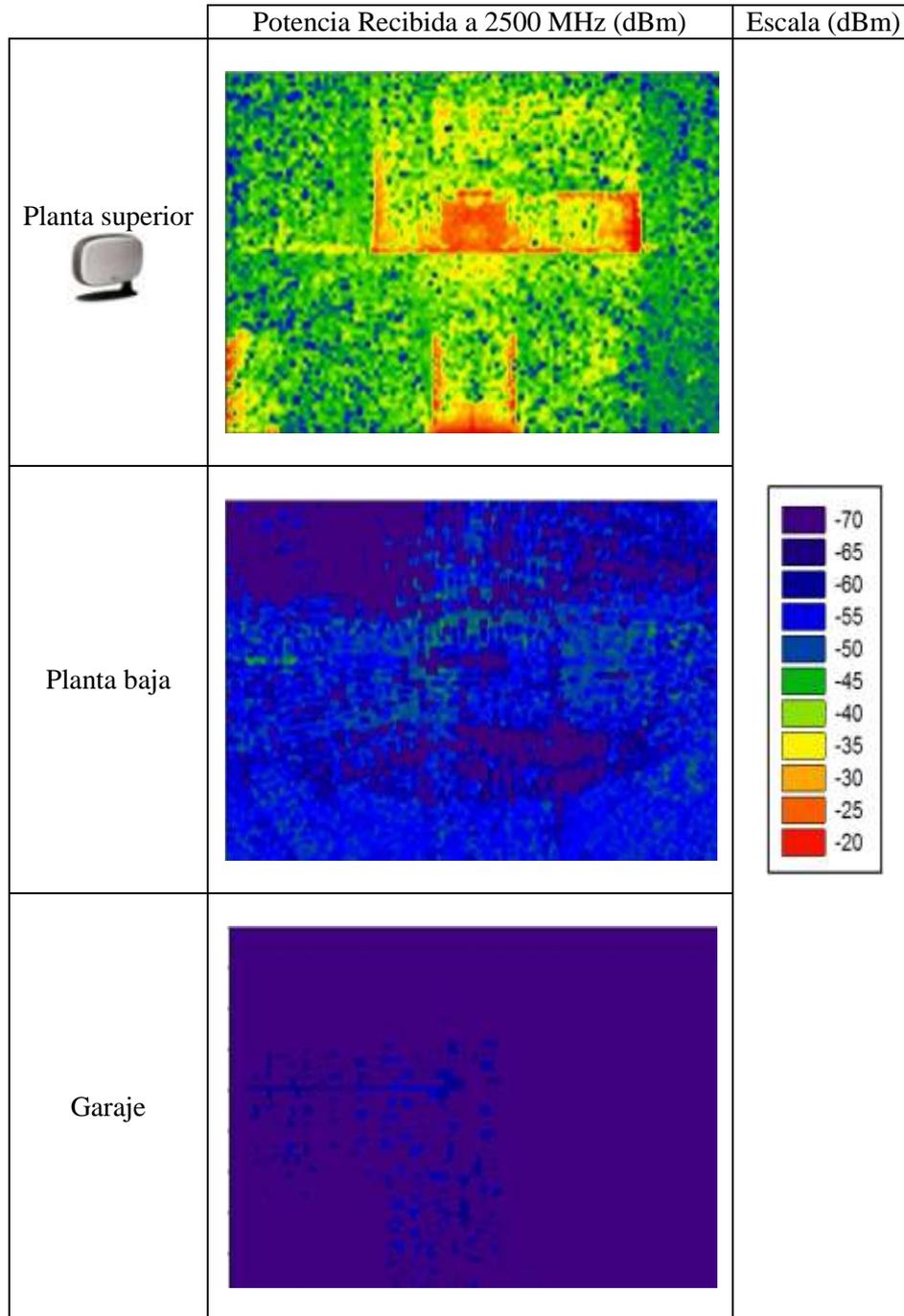


Tabla A3.5: Potencia recibida en las plantas con el emisor en la planta superior a 2500 MHz

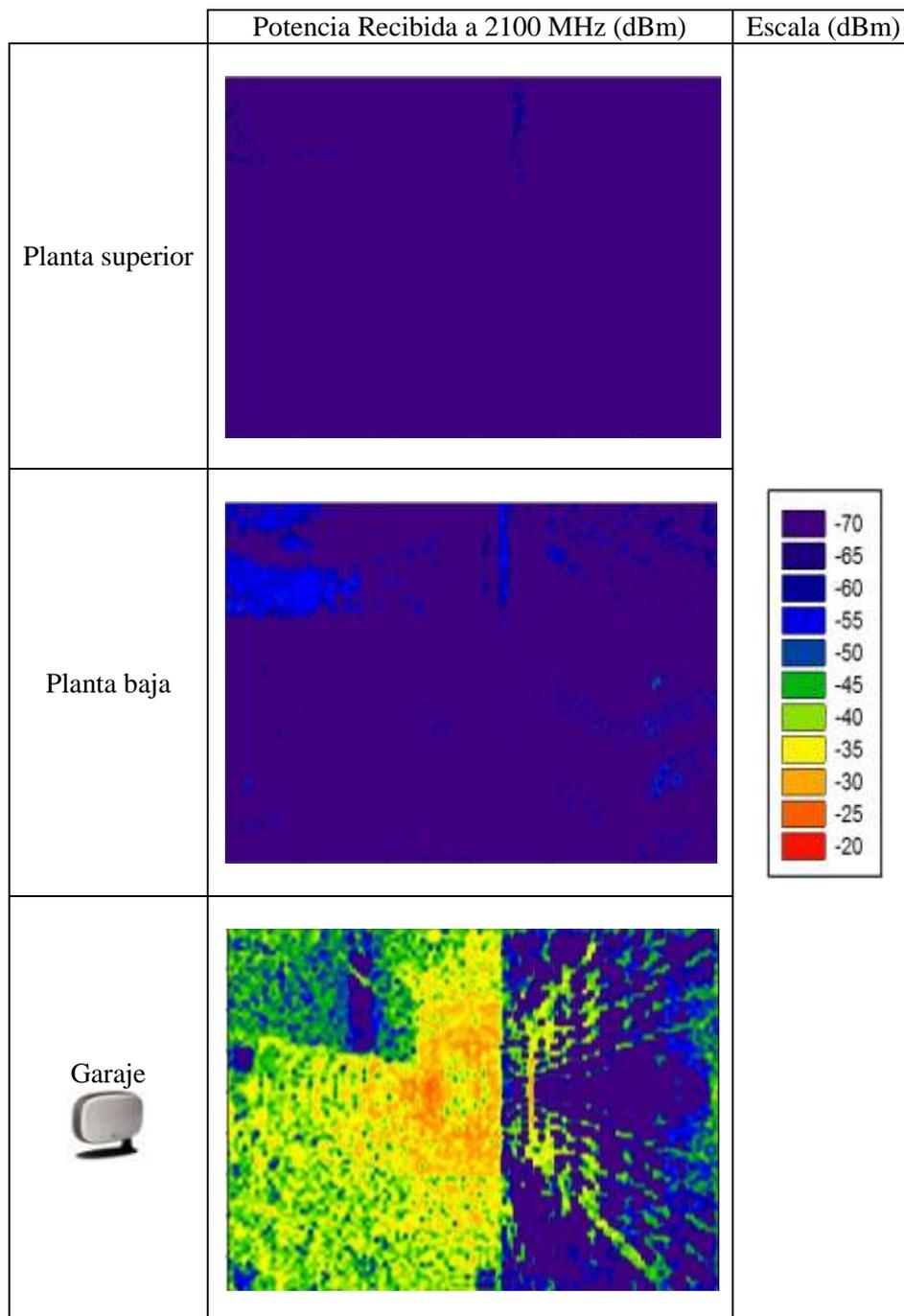


Tabla A3.6: Potencia recibida en las plantas con el emisor en el Garaje a 2100 MHz

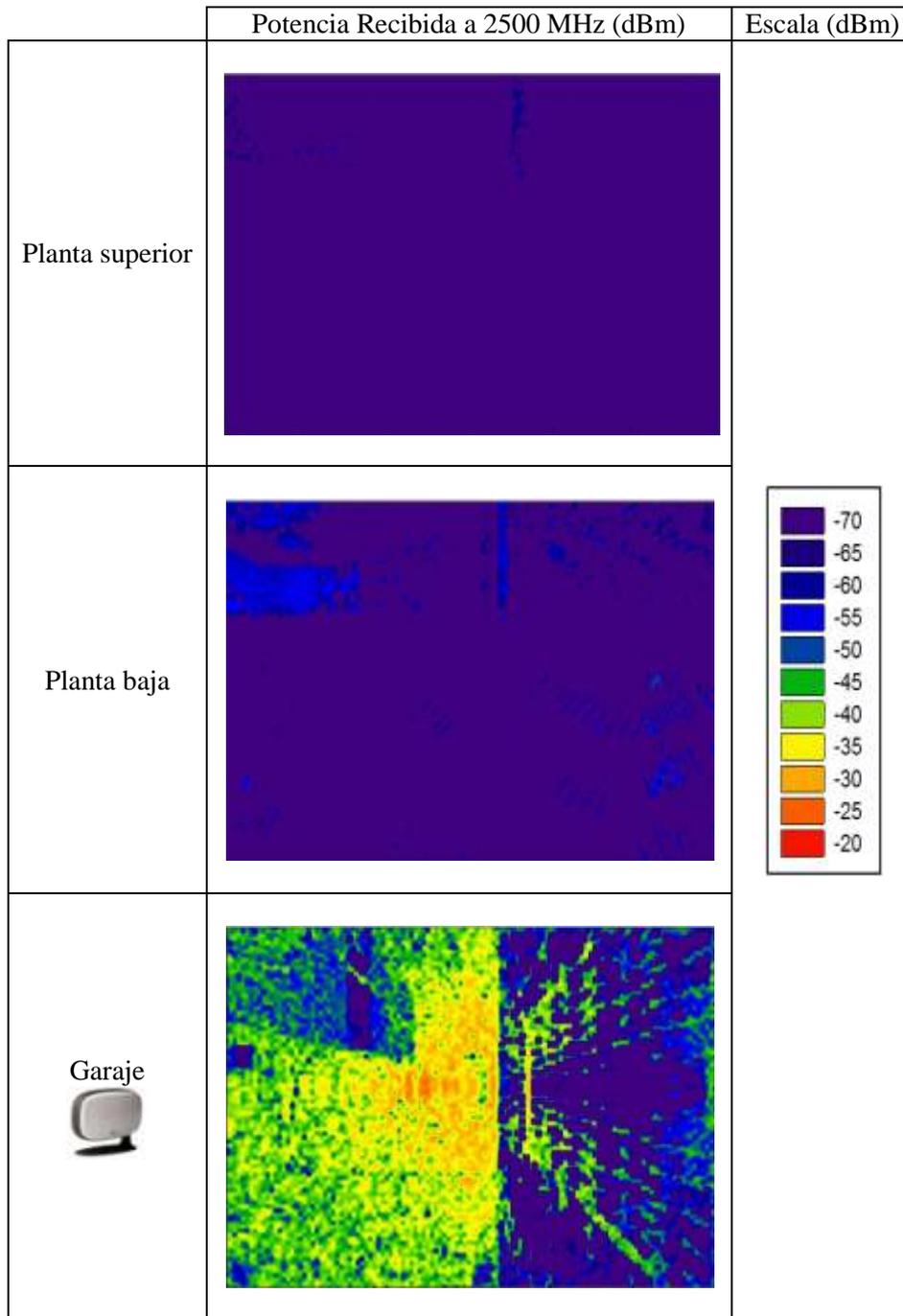


Tabla A3.7: Potencia recibida en las plantas con el emisor en el Garaje a 2500 MHz

Como se puede observar en estas tablas, los resultados entre las simulaciones a estas frecuencias no varían demasiado, pero sí lo hacen con las mostradas en los resultados de la memoria, simuladas a 900 MHz.

La mejor opción, como era de esperar, sigue siendo poner la femtocelda en la planta baja.