

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones



Ingeniería de Telecomunicación

Proyecto Fin de Carrera

Gestión de Interferencias en Sistemas Femtocelda

Autor: Máximo Morales Céspedes

Tutora: Ana García Armada

Octubre 2010

Agradecimientos

A mi familia.

A mis padres, por la educación que me han dado y toda la paciencia que han tenido conmigo, parte de este logro es vuestro.

A mis hermanos Ana Rosa y Fernando, que hacen que siga siendo un niño grande

A Rosa, la última en llegar, por “aguantarme” todo este tiempo y alegrarme cada día con una sonrisa

Finalmente agradecer al departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, especialmente a Ana, la oportunidad de realizar este proyecto y aprender junto a ellos

Índice

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	10
1.1. Introducción.....	11
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Fases de desarrollo.....	13
Capítulo 2. Estado del Arte.....	14
2.1. Introducción.....	15
2.2. Origen de las femtoceldas.....	15
2.3. Interferencias en sistemas femtocelda.....	17
2.4. Técnicas de gestión de interferencias.....	18
Capítulo 3. Sistemas Femtocelda.....	20
3.1. Introducción.....	21
3.2. Aspectos técnicos.....	25
3.3. Infraestructura de la red.....	26
3.4. Estandarización por el 3GPP.....	27
3.5. Femtoceldas WiMAX.....	31
3.6. Gestión de interferencias.....	38
3.7. Futuro de las femtoceldas.....	40
Capítulo 4. Modelos de Propagación y Parámetros de Simulación.....	44
4.1. Introducción.....	44
4.2. Modelo Log-Normal.....	45
4.3. Modelo Cost231-Okumura Hata.....	46
4.4. Modelo ITU P.1411.....	47
4.5. Modelo ITU-R P.1238.....	49
4.6. Parámetros de simulación.....	51
Capítulo 5. Gestión de Interferencias.....	52
5.1. Introducción.....	53
5.2. Escenario A. Enlace descendente de una macrocelda interfiere en el receptor de un e q u i p o usuario femtocelda.....	57
5.3. Escenario B. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el enlace ascendente del receptor femtocelda.....	67
5.4. Escenario C. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el receptor del equipo usuario de la macrocelda.....	76
5.5. Escenario D. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el receptor de la antena macrocelda	85
5.6. Escenario E. Enlace descendente de una femtocelda interfiere en el receptor de un femto punto de acceso vecino.....	94
5.7. Escenario F. Enlace ascendente de un terminal femtocelda vecino interfiere en el receptor de un punto de acceso FAP.....	100

5.8. Escenario G. Enlace descendente de una macrocelda interfiere en el canal adyacente del enlace descendente del equipo usuario de una femtocelda.....	104
5.9. Escenario H. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el canal adyacente del enlace ascendente del receptor femtocelda.....	107
5.10. Escenario I. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor del equipo usuario macrocelda.....	114
5.11. Escenario J. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor de la antena macrocelda.....	121
Capítulo 6. Coordinación entre puntos de acceso femtocelda.....	128
6.1. Descripción y objetivos.....	129
6.2. Introducción.....	129
6.3. Modelo de sistema.....	130
6.4. Simulación en distintos escenarios.....	133
6.4.1. Escenario A. Dos puntos de acceso con dos terminales	133
6.4.2. Escenario B. Dos puntos de acceso con dos terminales dentro de cobertura macro/micro celda.....	136
6.4.3. Escenario C. 15 puntos de acceso con distintas cantidades de terminales.....	140
6.4.4. Escenario D. 15 puntos de acceso con distintas cantidades de terminales dentro de cobertura macro/micro celda.....	144
6.5. Conclusiones.....	149
Capítulo 7. Conclusiones finales.....	152
Capítulo 8. Presupuesto.....	156
Referencias.....	160

Índice de figuras

- Figura 3.1. Esquema de una red femtocelda
- Figura 3.2. Detalle del despliegue de una femtocelda en una vivienda
- Figura 3.3. Punto de referencia luh
- Figura 3.4. Torre de protocolos de la interfaz luh
- Figura 3.5. Gestión de frecuencias entre macro y femtocelda
- Figura 3.6. Femtocelda WiMAX
- Figura 3.7. Ejemplo de una red WiMAX con puntos de acceso femtocelda
- Figura 3.8. Sistema formado por una femtocelda WiMAX
- Figura 3.9. Representación del traspaso entre celdas de diferente tecnología
- Figura 3.10. Cooperación entre redes WiFi y WiMAX
- Figura 3.11. Evolución de los servicios de voz y datos
- Figura 3.12. Estudio de la penetración de la tecnología femtocelda en oficinas
- Figura 4.1. Pérdidas de propagación. Modelo Cost231-Okumura Hata
- Figura 4.2. Pérdidas de propagación. Modelo ITU P.1411
- Figura 4.3. Pérdidas de propagación. Modelo ITU-R P1238
- Figura 5.1. Representación de los diversos enlaces simulados
- Figura 5.A.1. Escenario A
- Figura 5.A.2. Potencia recibida en FUE en función de la distancia entre FAP y terminal
- Figura 5.A.3. Tasa binaria HSDPA en función de la distancia entre FUE y FAP (caso macrocelda)
- Figura 5.A.4. Potencia recibida en FUE en función de la distancia entre FAP y terminal
- Figura 5.A.5. Tasa binaria HSDPA en función de la distancia entre FUE y FAP (caso microcelda)
- Figura 5.B.1. Escenario B
- Figura 5.B.2. Representación de una zona muerta
- Figura 5.B.3. Separación mínima entre MUE y FAP en función de la potencia transmitida
- Figura 5.B.4. E_c/N_0 en función de la distancia entre MUE y FAP
- Figura 5.B.5. Capacidad del enlace en función de la distancia entre MUE y FAP
- Figura 5.C.1. Escenario C
- Figura 5.C.2. Potencia recibida en MUE desde la femtocelda
- Figura 5.C.3. Máxima potencia de transmisión en FAP en función de la distancia al terminal MUE
- Figura 5.C.4. Disposición de las femtoceldas en el entorno macrocelda
- Figura 5.C.5. Detalle de la disposición de las femtoceldas dentro de la urbanización
- Figura 5.C.6. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (100 % FAPs activos)
- Figura 5.C.7. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (50 % FAPs activos)
- Figura 5.C.8. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (20 % FAPs activos)
- Figura 5.D.1. Escenario D
- Figura 5.D.2. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a múltiples usuarios FUE
- Figura 5.D.3. Escenario D. Servicios HSUPA
- Figura 5.E.1. Escenario E
- Figura 5.E.2. Esquema de simulación
- Figura 5.E.3. CDF de la tasa binaria disponible
- Figura 5.E.4. Esquema de simulación (Caso microcelda)
- Figura 5.E.5. CDF de la tasa binaria disponible (Caso microcelda)
- Figura 5.F.1. Escenario F. Detalle de víctima y agresor

Figura 5.F.2. Representación del compromiso entre distancias D_1 y D_2
Figura 5.F.3. Compromiso entre distancias D_1 y D_2
Figura 5.G.1. Escenario G
Figura 5.G.2. Evolución de la potencia macro y femtocelda en el terminal FUE
Figura 5.H.1. Escenario H
Figura 5.H.2. Separación mínima entre MUE y FAP en función de la potencia transmitida
Figura 5.H.3. Relación E_c/N_0 . Distancia MUE-FAP de 2 metros
Figura 5.H.4. Relación E_c/N_0 . Distancia MUE-FAP de 5 metros
Figura 5.I.1. Escenario I
Figura 5.I.2. Región de operación
Figura 5.I.3. Distancia máxima entre MNB y MUE para servicios de voz
Figura 5.I.4. Distancia máxima entre MNB y MUE para servicios HSDPA
Figura 5.J.1. Escenario J
Figura 5.J.2. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a múltiples usuarios FUE
Figura 6.1. Esquema de coordinación con dos usuarios interferentes
Figura 6.2. CBST Escenario A
Figura 6.3. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado
Figura 6.4. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado
Figura 6.5. CBST Escenario B
Figura 6.6. CDF de la tasa binaria en un esquema no coordinado
Figura 6.7. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado bajo macrocelda
Figura 6.8. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado bajo microcelda
Figura 6.9. CBST Escenario C
Figura 6.10. CBST Escenario C (FAP competitivos)
Figura 6.11. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado
Figura 6.12. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (15 usuarios)
Figura 6.13. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (12 usuarios)
Figura 6.14. CBST Escenario D
Figura 6.15. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado
Figura 6.16. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (15 usuarios)
Figura 6.17. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (12 usuarios)
Figura 6.18. CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (9 usuarios)

Índice de tablas

Tabla 4.1. Parámetros del modelo log-normal para distintos entornos
Tabla 4.1. Parámetros del modelo ITU R P.1238
Tabla 4.3. Parámetros de simulación
Tabla 5.1. Relación víctima - agresor para cada escenario
Tabla 5.A.1. Parámetros de la antena macro Nodo B
Tabla 5.A.2. Balance de enlace entre antena macro Nodo B y terminal FUE
Tabla 5.A.3. Parámetros del punto de acceso femtocelda
Tabla 5.A.4. Relación E_c/N_0 necesaria para una llamada de voz
Tabla 5.A.5. Parámetros de la antena micro Nodo B
Tabla 5.A.6. Balance de enlace entre antena micro Nodo B y terminal FUE
Tabla 5.B.1. Suposiciones realizadas en el escenario B
Tabla 5.B.2. Balance de enlace entre MUE y receptor femtocelda
Tabla 5.B.3. Potencia transmitida necesaria por la femtocelda para mantener una llamada de voz
Tabla 5.B.4. Radio de la zona muerta para cada clase de punto de acceso
Tabla 5.B.5. Parámetros de simulación para servicios HSUPA
Tabla 5.B.6. Parámetros del canal FRC #3
Tabla 5.C.1. Parámetros de simulación
Tabla 5.D.1. Ruido de base de la antena micro Nodo B
Tabla 5.D.2. Potencia de transmisión del usuario MUE en el borde de la zona muerta femtocelda
Tabla 5.D.3. Potencia interferente transmitida por el usuario femtocelda
Tabla 5.D.4. Incremento de ruido en la antena microcelda
Tabla 5.D.5. Parámetros de sistema. Servicios HSUPA
Tabla 5.D.6. Incremento de ruido en la antena microcelda. Servicios HSUPA
Tabla 5.E.1. Parámetros de simulación
Tabla 5.E.2. Parámetros de la antena microcelda
Tabla 5.F.1. Parámetros de simulación
Tabla 5.G.1. Parámetros de simulación
Tabla 5.H.1. Parámetros de canal
Tabla 5.H.2. Parámetros femtocelda
Tabla 5.H.3. Cobertura femtocelda utilizando CAG
Tabla 5.I.1. Parámetros de la antena macrocelda
Tabla 5.I.2. Parámetros del terminal macrocelda
Tabla 5.I.3. Parámetros del punto de acceso femtocelda
Tabla 5.I.4. Distancia máxima entre MNB y MUE cuando la distancia hacia FAP es de 2 metros
Tabla 5.I.5. Parámetros HSDPA
Tabla 5.J.1. Potencia interferente transmitida por el usuario femtocelda
Tabla 5.J.2. Incremento de ruido en la antena microcelda
Tabla 8.1. Conste total del proyecto

Abreviaturas

AP	<i>Access Point.</i> Punto de acceso
BER	<i>Bit Error Rate.</i> Tasa de error binario
BS	<i>Base Station.</i> Estación base
EIRP	<i>Equivalent Isotropic Radiated Power.</i> Potencia isotrópica equivalente
FAP	<i>Femto Access Point.</i> Punto de acceso femtocelda
FUE	<i>Femto User Equipment.</i> Usuario femtocelda, equivalente a HUE
HUE	<i>Home User Equipment.</i> Terminal femtocelda, equivalente a FUE
HNB	<i>Home Node B.</i> Punto de acceso femtocelda
MNB	<i>Macro Node B.</i> Antena macrocelda
MUE	<i>Macro User Equipment.</i> Usuario macrocelda
QoS	<i>Quality of Service.</i> Calidad de servicio
UE	<i>User Equipment.</i> Equipo usuario, terminal
RAN	<i>Radio Access Network.</i> Red de acceso radio
RSCP	<i>Received Signal Code Power.</i> Potencia de señal recibida
P-CPICH	<i>Primary Common Pilot Channel.</i> Canal de pilotos primarios
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSDPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
Backhaul	Núcleo central de la red
CIR	<i>Carrier to interference Ratio.</i> Relación portadora a interferencia
RSSI	<i>Received signal strength indication.</i> Indicador del nivel de señal recibida
RSCP	<i>Received signal code power.</i> Potencia de la señal codificada recibida
DPC	<i>Dirty Paper Coding.</i> Codificación
ZF	<i>Zero Forcing.</i> Forzamiento de cero
EVDO	<i>Evolution-Data Optimized o Evolution-Data Only</i>
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
3GPP2	<i>3rd Generation Partnership Project 2</i>
RANAP	<i>Radio Access Network Application Part</i>

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Hasta ahora las comunicaciones móviles han estado basadas en grandes estaciones base dedicadas a ofrecer servicios de voz y datos en una determinada zona, ya sea en escenarios urbanos cubriendo superficies con un radio de centenares de metros o en escenarios rurales en zonas de hasta varios kilómetros de radio. La aparición de nuevas tecnologías móviles como UMTS o WiMAX y el desarrollo de los terminales actuales, han hecho necesaria una actualización en los servicios ofrecidos por los operadores, obligando a aumentar tanto la frecuencia como el ancho de banda utilizado, lo que conlleva un uso mayor del cada vez más saturado espectro radioeléctrico. Desde el mercado de las telecomunicaciones se ha señalado a los sistemas femtocelda como solución a los problemas de cobertura, ancho de banda y falta de personalización en los servicios 3G ofrecidos actualmente, a la vez que se acelera la convergencia fijo-móvil.

Básicamente una femtocelda es una pequeña estación base de baja potencia para el uso en hogares o negocios. Dicha estación base se integra en la red móvil mediante una conexión de banda ancha, normalmente ADSL, de modo que cuando el usuario entre en su casa sea su propia red la encargada de ofrecerle cobertura 3G, sustituyendo automáticamente la ofrecida por el operador móvil correspondiente. Respecto al producto final, éste tendrá el aspecto de un router WiFi tradicional, de hecho, fabricantes como NetGear han comenzado a crear hardware incorporando ambas tecnologías, y podrán ser instaladas por el propio usuario en cualquier lugar de su domicilio sin necesidad de haber realizado un plan de frecuencias previamente.

La introducción de sistemas femtocelda ofrece ventajas tanto a los operadores móviles como a los usuarios. Por un lado, al operador le permite mejorar su cobertura en interiores, así como la liberación de parte del tráfico que circula en las macroceldas, terminando con la necesidad actual de aumentar el número de estaciones base. Mientras, los usuarios podrán solucionar los problemas de cobertura en sus hogares o negocios, a la vez que aumenta la velocidad de su enlace 3G con una reducción en el precio de su tarifa de datos.

Sin embargo, las femtoceldas también conllevan una serie de desventajas, la más evidente consiste en que no es una tecnología madura y la apuesta de los operadores en su utilización acarreará una serie de gastos en hardware, ofertas, publicidad... Pero no es este factor el principal problema de la tecnología femtocelda, el verdadero talón de Aquiles consiste en la gestión de interferencias. Tanto las antenas encargadas de ofrecer cobertura en cada domicilio, como sus terminales deben convivir con las antenas macrocelda y sus usuarios. Por ejemplo, en el caso de que un usuario macrocelda utilice la misma frecuencia que el terminal femtocelda aparece una interferencia en enlace ascendente de ambos elementos, reduciendo la calidad de los servicios ofrecidos e incluso creando una "zona

muerta” en torno al punto de acceso, dentro de la cual resultará imposible acceder a la cobertura macrocelda. Destacar la aplicación de diversas técnicas para minimizar el efecto nocivo de estas interferencias, desde mecanismos sencillos como la utilización de control de ganancia en las antenas receptoras, a la utilización de sistemas MIMO, o la coordinación entre estaciones base, de modo que los grupos de usuarios no sean totalmente cerrados y cada antena distribuya una parte de su potencia disponible a fin de buscar el bien común.

Finalmente, en cuanto al futuro de las comunicaciones inalámbricas, los operadores consideran que el crecimiento del mercado a través de la vía del crecimiento de usuarios se encuentra saturado, cobrando mayor importancia los servicios que puedan prestar así como el volumen de negocio que pueda surgir de éstos. Es en este aspecto donde la aparición de sistemas femtocelda toma un papel principal, en el que muchos operadores esperan encontrar el modo de reducir el tráfico en sus antenas macrocelda a la vez que abren un nuevo mercado orientado a la movilidad de dispositivos en entornos interiores.

1.2. Objetivos

Como hemos especificado en la introducción, la tecnología femtocelda no se encuentra totalmente desarrollada. Por lo tanto, a lo largo de este estudio buscaremos resumir de forma concisa el origen y futuro de las femtoceldas, así como la problemática que surge de su utilización, siendo la gestión de interferencias la parte central de nuestro proyecto. Luego, los objetivos planteados serán los siguientes:

- El primer objetivo consistirá en determinar las causas y consecuencias de la aparición de los sistemas femtocelda dentro de las comunicaciones inalámbricas, así como un estudio de los componentes que forman dichos sistemas a partir de los estándares fijados por el 3GPP.
- Buscaremos analizar el futuro próximo de los sistemas femtocelda. Para ello nos centraremos en las propuestas planteadas por operadores y fabricantes de hardware en el Mobile World Congress celebrado en 2009 en Barcelona.
- Una vez analizado los componentes y funcionamiento de un sistema femtocelda, llevaremos a cabo un estudio de la gestión de interferencias. En este sentido realizaremos distintas simulaciones en diez escenarios establecidos por el organismo femtoforum. Durante el estudio de dichos entornos, nos centraremos en determinar la degradación de los servicios de voz AMR “Adaptive Multi-Rate” a 12,2 Kbps y HSDPA/HSUPA “High Speed Downlink Packet Access/High Speed Uplink Packet Access”.
- El siguiente objetivo consistirá en proponer e interpretar mecanismos para minimizar el impacto de dichas interferencias. Basándonos en la referencia “Waterfilling Schemes for Zero-Forcing Coordinated Base Station Transmission” [37] aplicaremos un esquema de coordinación entre estaciones base como solución cooperativa entre los puntos de acceso de un escenario.

1.3. Fases del desarrollo

Este proyecto ha sido elaborado en paralelo con una beca de colaboración en el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la universidad Carlos III de Madrid.

Las fases de desarrollo han sido las siguientes:

- Creación del estudio tecnológico “Sistemas Femtocelda” en el que se realiza una definición detallada de sistema femtocelda y de los elementos que lo componen. Se realiza un resumen de los aspectos radioeléctricos así como de la arquitectura y terminología según el 3GPP. A lo largo de este apartado hemos utilizado como principal referencia los artículos publicados en la revista IEEE Communications Magazine en septiembre de 2009. **(Octubre 2009 - Diciembre 2009)**
- La segunda fase de nuestro proyecto ha sido la simulación de los diversos escenarios de interferencia establecidos por el femtoforum. En este sentido se han generado desde gráficas para delimitar la cobertura ofrecida por una femtocelda a planos de un apartamento especificando el nivel de interferencia en cada punto del domicilio. **(Febrero 2010-Mayo2010)**
- El siguiente paso fue proponer y elaborar un esquema de coordinación entre estaciones base como solución a los problemas surgidos de la convivencia entre femtoceldas. Aplicamos dicho esquema a varios escenarios en función del número de puntos de acceso y de la existencia o no de interferencia con origen macrocelda. **(Junio 2010 - Julio 2010)**
- Finalmente se llevó a cabo el desarrollo de las conclusiones de todos los estudios realizados y la redacción de la memoria final del proyecto. **(Julio2010 - Septiembre2010)**

Capítulo 2

Estado del Arte

Estado del arte

2.1. Introducción

Una vez definida la tecnología femtocelda, a lo largo de este capítulo se desarrollará el estado del arte de los temas relacionados directamente con el proyecto que nos ocupa. Estos temas son:

1. Estado del arte relacionado con el origen de las femtoceldas, indicando las causas y consecuencias de la inserción de esta tecnología dentro de la red móvil, así como los diferentes procesos de estandarización actuales y los interrogantes planteados.
2. Estado del arte referido a la gestión de interferencias, definiendo desde los aspectos regulatorios de las femtoceldas, a los diferentes tipos de interferencias que pueden surgir en la red móvil.
3. Estado del arte de las diferentes técnicas de gestión de interferencias planteados actualmente.

2.2. Origen de las femtoceldas

El punto de partida del proyecto *Sistemas femtocelda: Gestión de Interferencias*, son los diversos artículos relacionados publicados en la revista *IEEE Communications Magazine* en Septiembre de 2009. La referencia [1] realiza una breve definición de sistema femtocelda y presenta los motivos que han dado lugar a la aparición de este tipo de tecnología. Adicionalmente, [2] presenta una breve introducción en la que se establece a las femtoceldas como solución a los problemas de cobertura en determinados escenarios interiores, a la vez que aumenta considerablemente la tasa binaria ofrecida a cada usuario. Volviendo a la publicación *IEEE Communications Magazine*, en [3] y [4] diversos autores realizan un análisis de la estandarización de las femtoceldas por el 3GPP “3rd Generation Partnership Project” y 3GPP2 “3rd Generation Partnership Project 2”. Estos documentos abren una serie de interrogantes como la aparición de un nuevo tipo de interferencia en la red móvil, aspectos de seguridad o la posibilidad de ofrecer diferentes calidades de servicio a cada usuario. Finalmente, se presenta a las femtoceldas como una herramienta básica para el desarrollo del salto hacia servicios de cuarta generación.

En [2] y [5] se presentan los principales motivos, tales como la instalación de la antena femtocelda por parte del usuario o la dificultad de realizar un plan de frecuencia, que hacen de la gestión de interferencias uno de los mayores escollos que debe sortear esta tecnología. Una vez establecidas las causas, realiza una breve clasificación del tipo de interferencias entre las redes macro y femtocelda. Finalmente, establece sin entrar en detalle, una serie de técnicas para evitar el efecto nocivo de las interferencias, como la selección de portadora o la utilización de potencia adaptativa en los puntos punto de acceso femtocelda.

Respecto a la aplicación de las femtoceldas a la tecnología WiMAX, en las referencias [6] y [7], aparecen las primeras definiciones orientadas al estándar 802.16. A continuación realizan una descripción de la arquitectura WiMAX y del papel de las femtoceldas dentro de ésta. Finalmente muestran una perspectiva de los beneficios de su utilización en la cobertura y capacidad ofrecida a sus usuarios. En la referencia [8] encontramos un desarrollo de los requerimientos que deben de cumplir las femtoceldas dentro de la tecnología WiMAX, así como los desafíos y soluciones que su utilización plantea.

En [9] y [10] encontramos un enfoque ecológico de las femtoceldas. En dichos estudios señalan a la infraestructura de las comunicaciones e información como la causa de un gasto del 3% de la energía global y de la emisión de gases de efecto invernadero. Gran parte de este consumo se debe a la necesidad, por parte del operador, de utilizar miles de antenas macrocelda para conseguir cobertura nacional. En [10] muestran una serie de estudios en los que se concluye que la utilización de femtoceldas, podría solucionar la necesidad de instalar cada vez más antenas macrocelda debido a la demanda de mayores tasas binarias. Finalmente proceden a realizar un comparación de los beneficios directos e indirectos obtenidos en la utilización de femtoceldas.

En [11] Airvana presenta un análisis de la cantidad y características de las llamadas realizadas desde los hogares y negocios, así como un estudio de la edad de los usuarios que más uso hacen de la red móvil. Respecto a la visión de futuro de los sistemas femtocelda, en [12] encontramos una serie de propuestas basadas en las primeras experiencias de los usuarios utilizando este tipo de servicio. Las femtoceldas son presentadas como base para la creación de nuevos servicios de voz y datos, muchos de ellos orientados al ámbito de la domótica. Concluyen evaluando el potencial de explotación que este tipo de tecnología ofrece tanto a operadores como fabricantes de terminales, así como una serie de requisitos que deben cumplir, especialmente en el ámbito de la seguridad.

El siguiente paso de nuestra investigación fue revisar las presentaciones de operadores y fabricantes en el *Mobile World Congress* celebrado en 2009 en Barcelona. En las referencias [13], [14] y [15] encontramos un enfoque económico de la introducción de sistemas femtocelda, en la que empresas como Orange o picoChip señalan a éstas como una herramienta para ofrecer mejor cobertura en interiores y especialmente mejores tasas binarias a los usuarios. La referencia [16] muestra un enfoque de los nuevos servicios que las femtoceldas pueden generar, centrandose en el ámbito de la domótica y las redes sociales, mediante la expansión de utilidades multimedia en *streaming* debido al incremento en la velocidad. Finalmente en [14] y [17] establecen la necesidad de celdas de tamaño reducido ofreciendo servicio a un número pequeño de usuarios como herramienta esencial para el paso hacia servicios de cuarta generación. En este sentido señalan a la mala cobertura y capacidad que las macroceldas ofrecen dentro de los edificios como principal causa del bajo uso de los servicios multimedia en la red móvil. Finalmente realizan un sencillo análisis de los gastos e ingresos que las femtoceldas supondrían para el sector de las telecomunicaciones.

2.3. Interferencias en sistemas femtocelda

El siguiente paso de nuestro proyecto es evaluar el efecto de la introducción de los sistemas femtocelda en la red móvil actual. Comenzamos analizando los diferentes tipos de interferencia que afectan a las femtoceldas, así como las interferencias que éstas generan hacia el resto de usuarios. Una vez establecidos una serie de escenarios, procedemos a realizar una serie de simulaciones con el fin de evaluar el impacto en los servicios de voz y datos.

En la referencia [18] el femtoforum define los principales aspectos regulatorios de las femtoceldas, su interacción con la red macrocelda y el uso de xDSL como medio para llevar a cabo tareas de canal de retorno. Concluyen con una serie de opiniones de operadoras y fabricantes como Apple, Telefónica o T-Mobile en las que apuestan por la tecnología femtocelda como herramienta fundamental en los futuros servicios móviles.

En [19] y [20] el 3GPP comienza realizando una definición de los elementos que conforman una red femtocelda. Más tarde especifican los posibles modos de control de acceso, éstos pueden ser abierto, cerrado, e híbrido, y cada uno seguirá una política diferente de gestión de interferencias. En este sentido, destacar la necesidad de estandarizar el modo de realizar el traspaso entre femtoceldas o entre macro y femtocelda.

Como hemos visto, debe existir cierta convivencia entre los sistemas macro y femtocelda, [21] realiza un estudio de los beneficios originados en la coexistencia de ambas arquitecturas. Respecto al uso del mismo espectro radioeléctrico, en [22] encontramos un análisis de la discusión entre utilizar el mismo canal que las antenas macro NodoB o no, así como su aplicación a varias topologías de control de acceso. Finalmente realizan una serie de simulaciones para cada caso, donde comprueban las altas tasas binarias que las femtoceldas pueden alcanzar respecto al caso macrocelda, debido al bajo número de usuarios a los que prestan servicio.

Las referencias [23] y [24] son las encargadas de definir una serie de escenarios de simulación, en los que se pone a prueba la calidad de los servicios de voz y datos ofrecidos por la red móvil, tanto macro como femtocelda, cuando el nivel de interferencias es máximo. En este sentido, se llevarán a cabo numerosas simulaciones teniendo en cuenta las diferentes clases de femtoceldas definidas por el 3GPP.

En el documento [25] llevan a cabo una simulación de la capacidad ofrecida a los usuarios femtocelda cuando éstos se encuentran repartidos dentro de un escenario caracterizado por una macrocelda cocanal, con 7 antenas macro Nodo B cubriendo cada una un total de 3 sectores. Concluyendo que velocidades del orden de decenas de Mbits por segundo pueden ser alcanzadas utilizando técnicas de control adaptativo de potencia.

La referencia [26] muestra las suposiciones y resultados obtenidos de la simulación de un escenario urbano en el que existen un total de 25 apartamentos de 100 m² equipados con sistemas femtoceldas. Dentro de las suposiciones, especifican una serie de modelos de propagación y ecuaciones para calcular la capacidad ofrecida a cada usuario en función del parámetro CIR.

Respecto a los posibles escenarios planteados, en [27], [28], [29], [30] y [31] encontramos diferentes estudios de 3GPP en los que llevan a cabo una serie de simulaciones de los servicios de voz y datos disponibles, tanto para los casos de interferencia cocanal como canal adyacente.

2.4. Técnicas de gestión de interferencias

El último tema del proyecto se encuentra orientado hacia técnicas de gestión de interferencias y la reducción de sus efectos nocivos. En este sentido, hemos comprobado la existencia de dos tipos de corrientes. La primera consiste en la gestión de portadoras de manera inteligente, de modo que se pueda minimizar el efecto de la interferencia cocanal. La segunda trata sobre la aplicación de sistemas MISO “Multiple Input Single Output” en conjunto con esquemas de coordinación de estaciones base, de modo que los puntos de acceso femtocelda puedan colaborar a fin de conseguir un objetivo común.

En la referencia [32] varios autores proponen la asignación de frecuencias híbridas como solución a los problemas planteados en la discusión planteada por la posibilidad de transmisión cocanal frente a dividir el espectro entre macro y femtoceldas. Proponen que cada punto de acceso femtocelda realice un estudio del área cubierta por las antenas macro Nodo B, de modo que puedan elegir la frecuencia consecuentemente.

Los estudios llevados a cabo en las referencias [33] y [34] muestran los beneficios de utilizar control de potencia en una red de dos niveles, en este caso macro y femtocelda. Normalmente este tipo de técnica se utiliza para limitar la interferencia generada por celdas vecinas, sin embargo, en una red de dos niveles la interferencia cruzada puede ser mucho más significativa que en los esquemas convencionales. Por ello plantean la utilización de coordinación entre estaciones base macro y femtocelda.

Ultimamente muchos investigadores se encuentran realizando estudios sobre la aplicación de sistemas MISO junto a esquemas de coordinación a los sistemas femtocelda. En las referencias [35] y [36] encontramos una comparativa en clave de teoría de juegos de la utilización de coordinación en puntos femtocelda frente a la competición entre ellos. Demostrando como en el caso de que las femtoceldas compitan por ofrecer el mejor servicios a sus usuarios, el resultado global tiende a un punto de equilibrio de Nash que no resulta óptimo.

En [37] aplican un esquema de coordinación de estaciones base en conjunto con técnicas de Waterfilling. Los resultados muestran una mejora sustancial de la tasa binaria ofrecida a los usuarios, ya que la “red coordinada” adapta la potencia de transmisión de cada estación en función de la posición en la que se encuentre el usuario. Destacar que en dicha referencia no se estudia su aplicación a los sistemas femtocelda, el objetivo de nuestro proyecto será analizar el uso de este tipo de técnica sobre puntos de acceso femtocelda cercanos.

Capítulo 3

Sistemas Femtocelda

Sistemas Femtocelda

3.1. Introducción

Hasta ahora las comunicaciones móviles han estado basadas en grandes estaciones base 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. 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... 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 procedentes de otras compañías. 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.

Desde el sector de las telecomunicaciones se apunta a un crecimiento continuo en la velocidad de las redes móviles, según Martin Cooper de Arraycomm “Los servicios inalámbricos doblarán su capacidad cada treinta meses”. 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 microceldas 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 femtoceldas.

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, normalmente ADSL, 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. Respecto al producto final, éste tendrá el aspecto de un router Wi-Fi tradicional, de hecho, fabricantes como NetGear han comenzado a crear hardware incorporando ambas tecnologías.

La principal virtud de las femtoceldas consiste en que representan un enfoque positivo tanto para operadoras como usuarios. Estudios recientes afirman que el 50% de las llamadas de voz, y más el 70% del tráfico de datos se realiza desde escenarios interiores, 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 macro y micro celdas mejorando la calidad de los servicios en 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 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 la calle. A continuación mostramos las principales ventajas del uso de femtoceldas:

Aumento en la cobertura y capacidad

A pesar de la baja potencia de transmisión de un punto de acceso femtocelda, la relación señal a ruido más interferencia, SINR, será elevada debido a las cortas distancias entre transmisor y receptor. 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.

Incremento global en la capacidad de la red

Respecto a los escenarios interiores, el aumento en la capacidad resulta inmediato al utilizar tecnología 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.

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 femtoceldas 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 muestran que el coste por año de una macrocelda asciende a los 60.000\$ 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.

Instalación libre

En cuanto a la instalación del punto de acceso femtocelda, existe total libertad por el usuario para poder situarla en cualquier situación de su domicilio. Este hecho que aparentemente solo beneficia a los clientes, también supone una gran ventaja a los operadores. 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.

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 gama de puntos de acceso femtocelda con diferentes parámetros y calidades. 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 que 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 femtocelda supone un abanico de posibilidades para aumentar los ingresos, no solo de los operadores, sino también de las empresas de hardware y software.

Tecnología verde

Teniendo en cuenta los datos revelados en las referencias [9] y [10], 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 y HSPA. Por ejemplo, una antena macrocelda solamente puede mantener 39 usuarios activos utilizando un caudal HSDPA de 5 Mbps, de modo que la creación de nuevas antenas resulta inevitable. La aplicación de sistemas femtocelda 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.

Nuevas oportunidades

Finalmente, 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, empresas como Airvana, picoChip o Orange presentaron numerosas aplicaciones y posibilidades derivadas del uso de femtoceldas. Al tener nuestra propia red móvil en casa podremos acceder a servicios automáticos de mensajes de texto alarmándonos de situaciones concretas. Por ejemplo 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. Algunos de los principales interrogantes son:

Seguridad

El modo de funcionamiento de un punto de acceso femtocelda resulta muy parecido al de un router Wi-Fi tradicional, de modo que hereda los problemas típicos de una red inalámbrica. Cuestiones de privacidad, autenticación, acceso restringido... se han convertido en una de las principales preocupaciones de los usuarios. Por ejemplo, evitar que vecinos puedan acceder a nuestra red y a la vez permitir que familiares y amigos sí sean capaces de utilizarla. El 3GPP ha definido una serie de configuraciones en las que se puede definir el tipo de grupo, el tipo de canal utilizado o la configuración de la potencia transmitida, sin embargo, será necesario realizar múltiples avances en este ámbito.

Interferencias

Respecto al enlace entre usuarios y puntos de acceso, las femtoceldas hacen uso del espectro radioeléctrico usado por la red móvil. Por otro lado las normas del 3GPP y WiMAX garantizan la ortogonalidad entre celdas y realizan una gestión de interferencias basada en la reutilización de frecuencias mediante una planificación minuciosa de la posición de las antenas encargadas de dar servicio. Sin embargo, en el caso de las femtoceldas se espera que estas antenas sean instaladas por el usuario en cualquier localización de su domicilio, haciendo imposible realizar dicha planificación. De este modo se deberá realizar un estudio conciso de la gestión de interferencias, así como la aplicación de nuevos métodos para la mitigación de éstas, como la coordinación entre estaciones base o la selección de portadoras por los puntos de acceso.

Adaptación de la red IP

Una de los principales cuestiones surge en raíz a la utilización de la red IP como medio para la transmisión del canal de retorno. En este sentido la red IP debe ofrecer una calidad de servicio equiparable a la ofrecida por las femtoceldas. Una posible solución sería priorizar el tráfico de la red formada por las femtoceldas, sin embargo plantearía problemas de neutralidad de la red.

Necesidad de nuevos terminales

Según estudios realizados por Orange [13] más del 70% de los usuarios con problemas de cobertura estaría interesado en la instalación de un sistema femtocelda en su hogar. Sin embargo una de las principales preguntas que éstos realizaban era la necesidad y el coste de nuevos terminales adaptados a esta tecnología. El coste de un punto de acceso se encuentra en torno a los 150€ y respecto a los terminales, podrá utilizarse cualquiera de ellos con características 3G. De todos modos, resulta lógico que los operadores lancen ofertas en nuevos terminales y servicios especializados en sistemas femtocelda.

Nuevo producto

Finalmente destacar que la femtoceldas son un nuevo producto, lo que conlleva unos costes de lanzamiento, gasto en publicidad y puesta en marcha por parte de los operadores. Actualmente muchas empresas como Orange o Vodafone tiene puestas muchas esperanzas en la inserción de este tipo de tecnología, de hecho se estima que en 2012 habrá instalados un total de 70 millones de puntos de acceso. Sin embargo, será el tiempo el que determine la evolución de las femtoceldas dentro del mercado de las telecomunicaciones.

3.2. Aspectos técnicos

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 tasa binaria de un sistema puede calcularse de manera sencilla mediante la ley de Shannon, la cual nos proporciona la capacidad del enlace inalámbrico teniendo en cuenta únicamente el ancho de banda (W) y la relación señal a interferencia más ruido (SINR) del enlace. Respecto al primer parámetro, éste solo depende de la cantidad de espectro radioeléctrico que le haya sido asignado al canal, sin embargo la relación SINR 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 tasa 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 se mayor que en el caso macrocelda.
- Baja potencia de transmisión, hecho que se traduce en una reducción de las interferencias entre femtoceldas. A esta característica hay que añadir un descenso en las interferencias originadas en la macrocelda debido las pérdidas por propagación en exteriores y por penetración al atravesar los muros de cualquier edificio.
- Número de usuarios muy reducido. Al dar servicio únicamente a varios terminales puede ofrecer grandes valores de ancho de banda, mientras que una macrocelda capaz de cubrir grandes zonas es incapaz de alcanzar esos valores de calidad de servicio.

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. 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. Infraestructura de la red

Durante el siguiente apartado vamos a realizar una breve descripción de la infraestructura de un sistema femtocelda. En la Figura 3.1 encontramos al 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 DSL mediante el distribuidor contratado el usuario. 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.

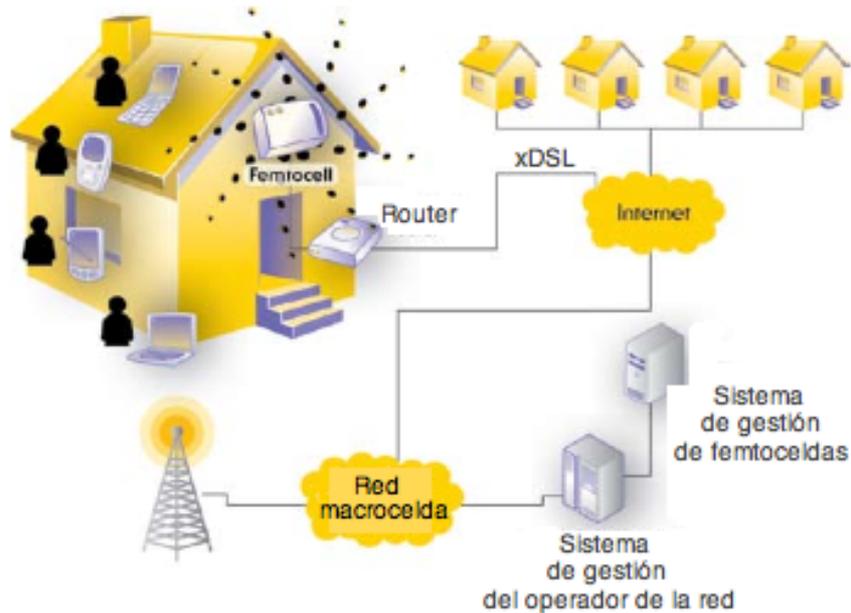


Figura 3.1. Esquema de una red femtocelda

En la siguiente representación, Figura 3.2, observamos 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 WiFi, y el teléfono fijo mediante voz sobre IP.

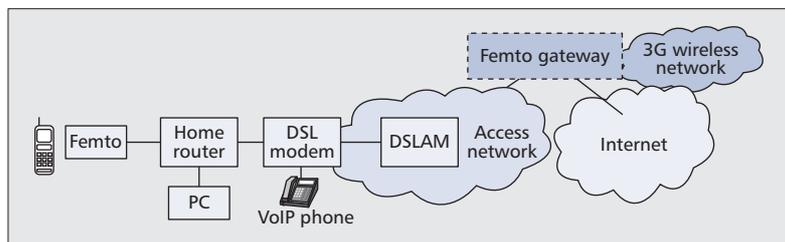


Figura 3.2. Detalle del despliegue de una femtocelda en una vivienda

3.4. 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.

Aspectos Radioeléctricos

Actualmente hay pocos sistemas que se asemejen al funcionamiento de una femtocelda, el ejemplo lógico son las redes WiFi que existen en millones de hogares, ya que operan en un área reducida ofreciendo una extensión del servicio ADSL. Sin embargo este tipo de redes no tiene que convivir con una red de gran tamaño a la que puede acceder cualquier ciudadano como es el caso de la convivencia entre femto y macroceldas. Por esta razón es necesario realizar un estándar de modo que cualquier empresa interesada en la fabricación de productos que utilicen la tecnología femtozona solvete los siguientes problemas radioeléctricos:

- Manejo de las Interferencias. La tecnología femtocelda tiene que convivir con multitud de dispositivos, WiFi, macroceldas, otras femtoceldas... por lo que el manejo de interferencias resulta un aspecto crucial para su correcto funcionamiento.
- Aspectos Regulatorios. Una femtocelda se puede reducir a una pequeña estación base transmitiendo en el espectro adquirido por el operador. Por lo tanto debe cumplir con las leyes y regulación de cada país.
- Instalación. Se espera que sean los propios usuarios los encargados de instalar los dispositivos femtozona, es decir, podrán situarse en cualquier sitio y cambiar su ubicación a lo largo del tiempo. Por lo tanto la localización del dispositivo no debe suponer un problema grave para ofrecer una buena calidad de servicio.

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 necesario una buena calidad en este tipo de servicio. 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, 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.

- HNB "Home Node B": Genéricamente el 3GPP habla de HNB a la hora de referirse a una femtocelda. El equipo local del usuario se comporta como un nodo a través de la interfaz Uu (interfaz aérea) y se conecta en 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 luCS/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.

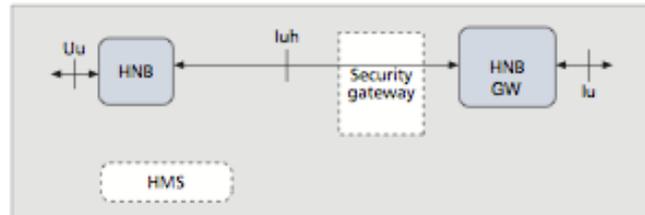


Figura 3.3. Punto de referencia luh

En la Figura 3.3 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 luh. 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 luCS/luPS, 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, lo 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 mostramos la torre de protocolos de la interfaz luh, entre el HNB, SeGW y HNB-GW.

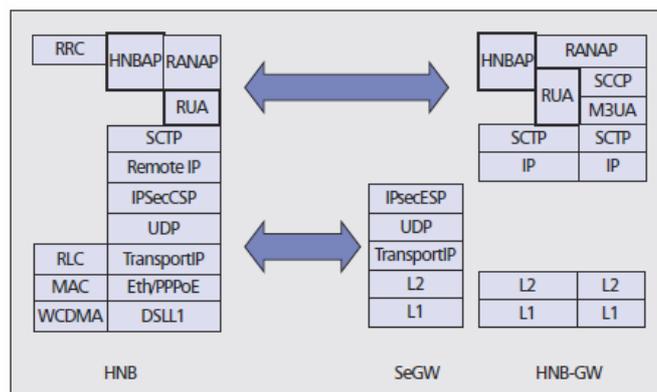


Figura 3.4. Torre de protocolos de la interfaz luh

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 lu, 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.

Configuraciones

En la referencias [20] y [23] encontramos los diferentes tipos de configuraciones disponibles a la hora de desplegar un sistema femtocelda (Home NodeB). En este sentido lo primero que debemos definir son las propiedades que definen cada canal, éstas son:

Acceso abierto o Grupo cerrado

En definitiva determina si una femtocelda se comporta de manera pública o privada. Para escenarios con acceso abierto, el HNB puede ofrecer servicio a cualquier terminal cercano, mientras que para grupos cerrados, el punto de acceso tiene limitado el servicio a un número cerrado de usuarios que pertenecen a un grupo determinado

Canal dedicado o Canal compartido

El punto de acceso femtocelda puede operar en un canal separado o compartido con el resto de la red móvil cercana, macroceldas, microceldas... Llegados a este punto destacar que a lo largo del proyecto nos referiremos a “canal” cuando hablamos de canales de frecuencia, en los casos en los que tratemos con canales lógicos siempre añadiremos el tipo de canal, por ejemplo, canal P-CPICH.

Potencia máxima de transmisión fija o adaptativa

La femtocelda puede tener fijada su potencia máxima de transmisión. Sin embargo, necesitaremos que sea sensible a las interferencias creadas por otras redes, por lo que existe la posibilidad de utilizar control adaptativo de potencia, de modo que su potencia de transmisión pueda ajustarse para minimizar los efectos nocivos de otras redes cercanas.

De acuerdo con estas propiedades, 3GPP define las siguientes configuraciones posibles para una red basada en femtoceldas.

Configuración A. Grupo cerrado, canal dedicado, potencia de transmisión fija

El tipo de configuración A, se caracteriza por un acceso controlado al HNB mediante un acuerdo o negociación entre el HNB y el operador de la red. Por otro lado, el acceso a la femtocelda se encuentra restringido a un número reducido de usuarios. Respecto al canal utilizado, destacar que éste no estará compartido con la macro red del operador. En el peor de los casos, el canal adjudicado al HNB es un canal adyacente al utilizado por un operador distinto. Finalmente la potencia de transmisión se encuentra fijada por el operador de manera óptima para reducir las interferencias entre la macrocelda y el HNB.

Configuración B. Grupo cerrado, canal dedicado, potencia de transmisión adaptativa

Al igual que en la configuración A, en este caso el acceso al HNB se encuentra restringido a un número cerrado de suscriptores y éste posee un canal propio dedicado a prestar servicio a sus usuarios. Sin embargo, la potencia transmitida por la femtocelda es

adaptativa, es decir, puede variar la radiación emitida a fin de reducir las interferencias entre sistemas. Cabe destacar que la potencia transmitida estará acotada, por lo que habrá unos límites fijos de potencia máxima y mínima.

Configuración C. Grupo cerrado, canal compartido, potencia de transmisión adaptativa

La configuración C se define por restringir el acceso a la femtocelda a un grupo determinado de usuarios. En este caso se comparte el canal con una macrocelda, por lo que nos encontramos en el peor caso en cuanto a interferencias. Será necesaria una negociación entre las redes para ajustar la potencia radiada a fin de minimizar los efectos de las interferencias, por lo que no se contempla la utilización de sistemas con potencia de transmisión fija.

Configuración D. Canal compartido parcial

Este tipo de configuración se trata de una solución híbrida entre el canal dedicado y el canal compartido. En este caso el HNB trabaja en frecuencias compartidas con la macrocelda, sin embargo, ésta tiene mayor ancho de banda disponible, de modo que si detecta problemas debido a interferencias, puede dejar libre las frecuencias en las que opera los HNB's y utilizar solo la parte limpia. En la Figura 3.5 observamos un sencillo esquema de la gestión de frecuencias:

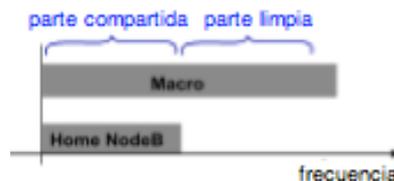


Figura 3.5. Gestión de frecuencias entre macro y femtoceldas

En principio la configuración D se presentó como una solución en el caso de femtoceldas operado en grupos cerrados de usuarios, sin embargo también es aplicable a sistemas con acceso abierto, a fin de limitar la influencia del HNB en la macrored, permitiendo un mayor control de la movilidad.

Configuración E. Acceso abierto, canal dedicado o compartido

Finalmente el tipo E se trata de la configuración más “libre”, en este caso el acceso se encuentra abierto para todos los usuarios, ya sea en un canal dedicado o compartido con otra red.

Interacción entre macro y femto celdas

3GPP contempla una serie de situaciones en las que un usuario puede hacer uso de los servicios macro y femto celda, éstas son:

- HNB fuera de cobertura GSM o UMTS ofrecido por macroceldas
- HNB dentro de cobertura GSM suministrada por una macrocelda
- HNB dentro de cobertura UMTS suministrada por una macrocelda, ambos entre la misma frecuencia
- HNB dentro cobertura UMTS suministrada por una macrocelda utilizando distintas frecuencias

La prioridad de los dispositivos será encontrar un sistema femtocelda que le ofrezca servicio, en caso de no encontrar ninguno, comenzará a realizar una búsqueda de servicios suministrados por una macrocelda. Respecto a la selección de celdas, 3GPP propone utilizar una estructura jerárquica, en la que los dispositivos del usuario podrán buscar cobertura femtozona a pesar de tener buena cobertura a través de una macrocelda, es decir, solo comenzará a buscar soluciones más allá de las femtoceldas, cuando la cobertura ofrecida por éstas sea muy débil o nula. Además, destacar la intervención de los nodos femtocelda, que pueden estar configurados para esperar a una serie de usuarios en concreto o para prever gran movilidad en la identidad de los usuarios, por ejemplo, en un hotel ofreciendo servicio a sus clientes.

Un aspecto novedoso es la posibilidad de utilizar distintos PLMN ID “Public Land Mobile Network Identification” en macro y femto celdas. Las ventajas que ofrece este tipo de configuración son una reducción en el consumo de batería de los dispositivos, ya que será necesaria menor potencia de transmisión y reducir el tráfico de señalización en el núcleo central de la red. En contra, actualmente los operadores no están preparados para manejar diferentes identificaciones para un mismo dispositivo, y las actuales tarjetas SIM no serían válidas para este tipo de configuración. Debido a esta propiedad, es necesario definir la forma de selección del tipo de identificación del terminal. Existen dos posibilidades, la primera de ellas es manual, la red macrocelda no necesita buscar dispositivos y ofrecerles los parámetros necesarios para prestarles servicio. Se trata de un mecanismo robusto que conseguiría reducir el tráfico de señalización. El principal inconveniente reside en que el usuario tendrá que cambiar manualmente este parámetro. La segunda se basa en la utilización de una PLMN equivalente, en este caso será necesario añadir una lista de PLMNs que deberá ser actualizada.

Conclusiones

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, y la implantación de éstos dentro del núcleo de la red de servicios móviles.

3.5. Femtoceldas WiMAX

WiMAX “Worldwide Interoperability for Microwave Access” es una tecnología basada en el protocolo IEEE 802.16, el cual proporciona una gran movilidad a los servicios de banda ancha. Está propuesta como la solución para dar servicios de banda ancha en zonas rurales donde el despliegue de cable o fibra es complicado debido a los elevados costes y a la baja densidad de población.

El organismo encargado de realizar la estandarización de la tecnología WiMAX es el WiMAX Forum, actualmente han especificado un rango de frecuencias de utilización entre 2.5 GHz y 3.5 GHz, si bien WiMAX esta definido para frecuencias de hasta 66GHz.

Diversos estudios han señalado el rápido crecimiento de la tecnología WiMAX en los hogares, y se espera que en el año 2012 el número de domicilios equipados con esta tecnología ascienda a 14,1 millones. Por otro lado, se ha demostrado que en torno al 65% de los servicios móviles se realizan desde escenarios interiores. Es en este punto donde entran en juego las femtoceldas como medio para ofrecer servicio WiMAX en un futuro.

Debido al aumento de la frecuencia en la señal, la cobertura dentro de escenarios interiores se ve seriamente afectada. Gracias a las femtoceldas se podrá solucionar este problema, mientras que los operadores móviles se benefician de un canal de retorno (red que conecta estaciones base celulares con el nodo principal) de bajo coste. Desde el punto de vista de los usuarios, podrán disfrutar de mejor cobertura, ancho de banda y acceder a nuevas aplicaciones innovadoras.

Volviendo al lanzamiento de la tecnología WiMAX, al utilizar frecuencias altas en torno a 3 GHz, ésta se veía perjudicada debido a los problemas en escenarios domésticos, ya que en un servicio típico basado en macroceldas se producía una mala calidad de servicio, especialmente en descargas de vídeos y datos. Este hecho tiene un impacto grande sobre los ingresos de los operadores, ya que tendrían que aumentar el número de estaciones base para poder ofrecer servicios con la calidad demandada actualmente.

Llegados a este punto, los operadores WiMAX se encontraron con el compromiso de aumentar la cobertura sin que esto suponga un gran desembolso económico. La solución consiste en introducir una extensión de la red móvil dentro de los edificios, luego las femtoceldas WiMAX se perfilan como la mejor solución tanto para los operadores como para los usuarios finales.

Que es una femtocelda WiMAX

Una femtocelda WiMAX esta formada por un equipo local adquirido por el cliente conocido como punto de acceso a WiMAX (WMAP). Este punto de acceso tiene un tamaño pequeño, similar a los actuales router WiFi, y servirá como canal para conectar a los usuarios de la femtocelda con el núcleo de la red móvil. Encontramos una representación de una femtocelda WiMAX en la Figura 3.6.

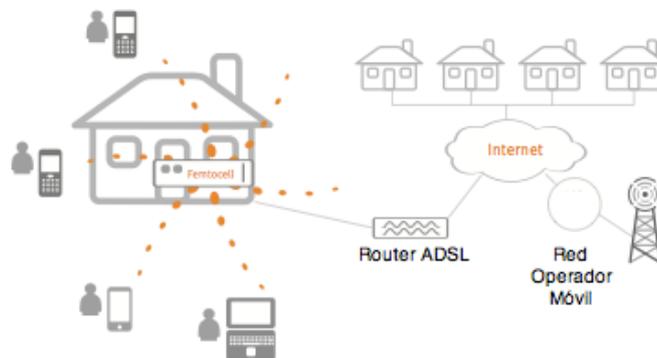


Figura 3.6. Femtocelda WiMAX

La aplicación de femtoceldas WiMAX en los hogares, supone una serie de ventajas tanto para operadores como usuarios:

Operadores:

- Adquisición gratuita de la zona donde instalar las celdas de telecomunicaciones
- Bajo coste de mantenimiento de su propia red.
- Descenso en gastos tanto en equipamiento para la red como en gastos de operación
- El consumo de electricidad por parte del operador es mínimo
- Conseguiría eliminar gradualmente las macroceldas, a la vez que aumenta la cobertura y los servicios ofrecidos.

Usuarios:

- Servicios móviles más atractivos
- Aumento en la cobertura, especialmente en entornos interiores
- Descargas de datos y video de alto rendimiento
- Reducción de los costes en los servicios móviles

Arquitectura de la red WiMAX basada en Femtoceldas

En los sistemas tradicionales, las estaciones base encargadas de dar servicio tanto en macro como en micro celdas están conectadas directamente con la red del operador mediante canales dedicados únicamente a este uso. De esta forma, existen miles de macroceldas dirigidas mediante el controlador radio de la red RNC “Radio Network Controller”. Por otro lado, el encargado de la gestión de dichas estaciones es el RRM “Radio Resource Manager”.

Para integrar los puntos de accesos femtocelda dentro de la actual red móvil es necesario crear una estructura de red que conecte estos puntos de acceso con el servicio proveedor de internet (ISP) mediante IP con la estructura celular actual. En la Figura 3.7 mostramos ejemplo de red WiMAX empleando femtoceldas, podemos distinguir dos componentes principales:

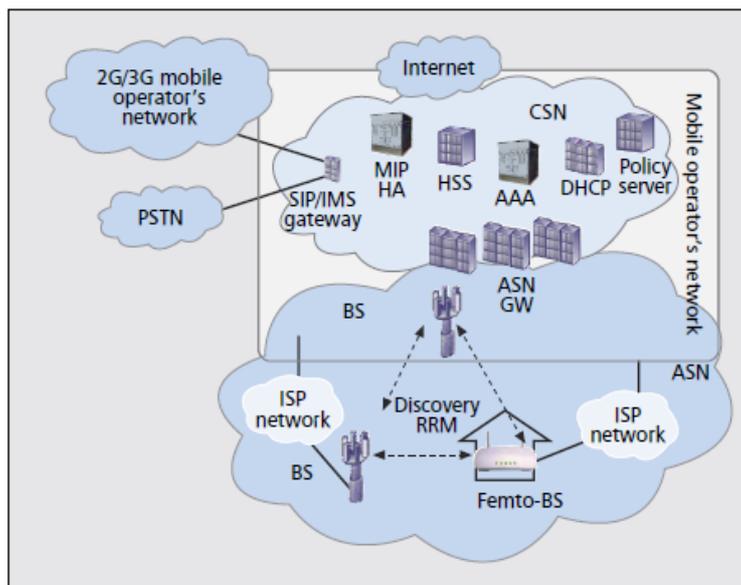


Figura 3.7. Ejemplo de una red WiMAX con puntos de acceso femtocelda

ASN “Access service network”

En todas las estructuras de redes IP, es dentro del ASN donde se conectan tanto las estaciones base de los operadores, macroceldas y microceldas, como los usuarios de femtocelda con el ISP a fin de reducir los costes de implementación de la conexión troncal.

CSN “Connective service network”

El CSN está formado por un conjunto de servidores como el servidor encargado de la autenticación, autorización y contabilidad (AAA), el servidor de IP móvil (MIP), el agente de base (HA) y el servidor de política del sistema (Policy Server). El encargado de conectar ambos módulos es la interfaz ASN Gateway. Las estaciones base se comunican con los

puntos de acceso femtocelda mediante la red IP, permitiendo obtener la información necesaria de los servidores sin entrar directamente en el CSN.

La arquitectura de una red WiMAX basada en femtoceldas, tiene como punto de partida una red WiMAX básica la cual diferencia entre los dominios funcionales y comerciales mediante el NAP "Network Access Provider" y el NSP "Network Service Provider". Cuando hablamos de NAP nos referimos a una entidad encargada de gestionar la infraestructura radioeléctrica de WiMAX, se trata de un conjunto de uno o mas ASN's los cuales ofrecen los servicios ya comentados, AAA, MIP... a través del ASN-GW. NSP es un entidad comercial que gestiona las suscripciones de usuarios y proporciona conectividad IP y servicios WiMAX a estos usuarios en función de los servicios contratados.

En este sentido, la aparición de la tecnología femtocelda y su aplicación a redes WiMAX, ha originado la creación de nuevas entidades como:

Femto-NSP:

Es el responsable de las operaciones, de autenticación y gestión de los puntos de acceso femtocelda para redes WiMAX (WFAP). Se encuentra separado de los NSP de la red convencional, de esta forma la red femtocelda puede gestionarse independientemente.

Sistema de gestión femtocelda (FMS)

Es la entidad que da soporte a las operaciones y mantenimiento de los puntos de acceso femtocelda. Dado que podrán existir muchos puntos femtocelda dentro de una misma macrocelda, es el encargado de manejar los traspasos y los parámetros de las estaciones base para organizar y optimizar la red. Destacar el papel del servidor SON, encargado de medir y analizar el rendimiento de la red, a fin de realizar una organización óptima de ésta.

Femto-NAP

Consiste en un conjunto de uno o mas femto-ASN's, se trata de una serie de funciones de red necesarias para ofrecer servicio WiMAX. Dentro del femto-NAP se encuentran las entidades encargadas de ofrecer seguridad al punto de acceso femtocelda como el SeGW "Femtocell security gateway", el cual conecta al usuario con el femto ASN-GW mediante IPSec en modo túnel.

Femto ASN-GW

Es la entidad encargada de controlar los puntos de acceso femtocelda y conectar a estos con el CSN y el NAP de la red convencional WiMAX

La distribución de estos elementos dentro de la red WiMAX pueden observarse en la Figura 3.8:

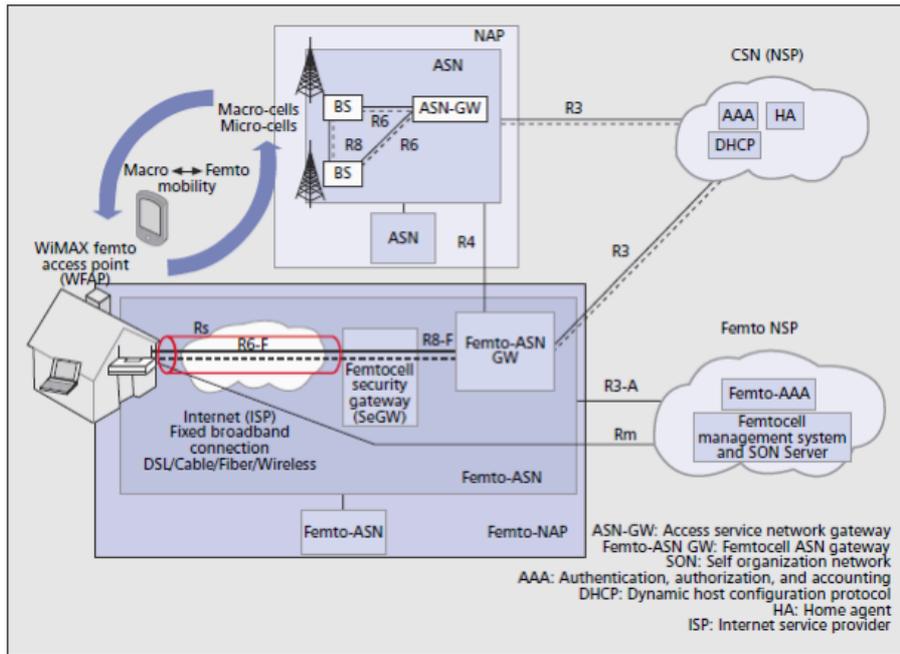


Figura 3.8. Sistema formado por una femtocelda WiMAX

Retos que afrontan las femtoceldas WiMAX

Traspaso entre celdas

Conforme los escenarios basados en femtoceldas WiMAX se encuentren distribuidos en los hogares, tendrán que convivir en armonía con los sistemas basados en macroceldas. Por ejemplo, un usuario enciende un terminal móvil WiMAX dentro de su femtocelda correspondiente, pero durante la mañana acude a su trabajo, donde los servicios móviles son suministrados por una macrocelda o por otra femtocelda, por lo tanto necesitaremos una serie de protocolos y sistemas capaces de realizar la transferencia entre distintos tipos de celdas de manera fluida.

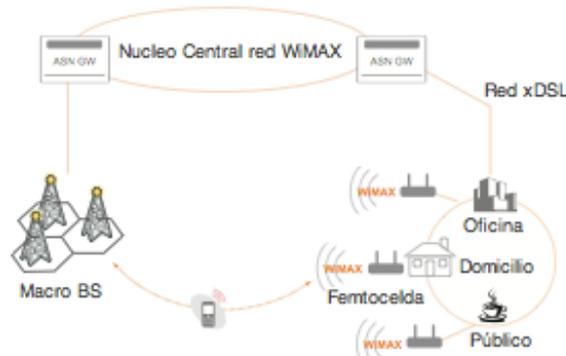


Figura 3.9. Representación del traspaso entre celdas de diferente tecnología

Interferencias entre macro y femtoceldas

Típicamente en los esquemas macrocelulares la ubicación, frecuencia, potencia de transmisión, cobertura... han sido estudiadas punto por punto a fin de evitar interferencias entre estaciones base. En el caso de las femtoceldas, el usuario instalará su equipo en cualquier punto, por lo tanto habrá que evitar las interferencias entre otros equipos

femtocelda. Adicionalmente, el operador debe tener la certeza de que la red de femtoceldas no interfiere con su red macrocelular.

En este aspecto aparecen cuestiones como los aspectos regulatorios de cada país, la potencia máxima de transmisión, espectro de emisión, y la necesidad de sistemas internos dentro de la red móvil para gestionar la interferencia entre femto y macroceldas. Destacar que se trata de un problema totalmente dinámico, habrá que manejar multitud de escenarios, desde urbanos con una gran densidad de usuarios, hasta rurales en donde apenas habrá accesos femtocelda.

Sincronización y Localización

Tanto la localización como la sincronización del nodo femtocelda pueden llegar a ser factores críticos en el correcto funcionamiento de ésta. Una primera solución fue utilizar sistemas GPS para determinar la correcta localización y el tiempo de sincronización, sin embargo, esto no será posible en todos los casos ya que el uso de femtoceldas está dirigido sobre todo a escenarios interiores con baja cobertura. Por lo tanto serán necesarias diferentes soluciones que permitan asegurar un nivel mínimo de sincronización y ubicación.

Cooperación con redes WiFi

Actualmente millones de hogares cuentan con una red inalámbrica WiFi, por lo que la tecnología WiMAX se encuentra obligada a convivir con ella. Un aspecto a desarrollar será la cooperación entre ambas redes. Por ejemplo, un usuario se encuentra conectado mediante una red WiFi, sin embargo para mejorar la calidad de sus servicios, el mismo abonado decide conectarse mediante WiMAX, por lo tanto el punto de acceso tendrá que coordinar el cambio de red con el núcleo de la red móvil del operador. En la siguiente figura mostramos un sencillo esquema de la interacción entre nodos WiFi y WiMAX:

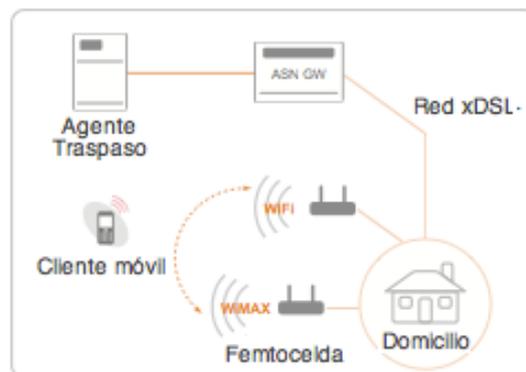


Figura 3.10. Cooperación entre redes WiFi y WiMAX

Seguridad y control de QoS

Será necesario asegurar los aspectos relativos a la seguridad en los sistemas femtocelda, especialmente en escenarios en los que exista una gran densidad de éstas. Además, el éxito de estos sistemas depende en gran parte de la posibilidad de ofertar diversos tipos de servicio, de modo que los operadores puedan ofrecer distintos tipos de tarifas que se ajusten a los deseos de los consumidores.

Acceso a invitados a la red WiMAX

Como es lógico, una femtozona es un sistema dinámico en el que se producen cambios continuamente. Un interrogante de las femtoceldas WiMAX es cómo un punto de acceso (WFAP) puede configurarse de manera flexible para aceptar visitantes con servicios similares a los que éstos tenían contratados con su operador móvil.

Fases de la estandarización

El WiMAX Forum ha comenzado a desarrollar el estándar de los sistemas WiMAX basados en tecnología femtocelda en dos fases. La primera de ellas, basada en el IEEE 802.16-2009, y una segunda encargada de desarrollar funcionalidades adicionales y mejorar el rendimiento de la red.

Primera fase

Durante la primera fase el WiMAX Forum incluye especificaciones de grupo de trabajo en red (NWG), como la definición de perfiles de estación base y los requerimientos que éstas deben cumplir. El objetivo principal de esta fase es simplificar todo lo posible los aspectos radioeléctricos y permitir la implementación de sistemas femtocelda con un bajo coste y gran operabilidad, todo ello cumpliendo las especificaciones WiMAX. Los cambios más importantes son:

- Ajuste del rango dinámico de la potencia transmitida
- Indicación del tipo de celda en función del parámetro CellType
- Gestión de interferencias, y de la potencia del enlace descendente

Segunda fase

En la segunda fase se describen una serie de técnicas definidas en la versión 802.16m. Estas son

- Sincronización
- Gestión de movilidad
- Almacenamiento de información de macroceldas vecinas
- Barrido de frecuencias
- Auto configuración
- Gestión de interferencias
- Coordinación de las estaciones base

3.6. Gestión de Interferencias

Como ya sabemos, los sistemas femtocelda tienen un tamaño reducido, bajo coste y alto rendimiento, estas características hacen necesaria una mayor eficiencia espectral frente a la ofrecida por las macroceldas. Durante este proyecto vamos a realizar un estudio de las interacciones tanto entre sistemas femtocelda, como entre sistemas femto y macrocelda. Estas interacciones pueden llegar a ser totalmente destructivas para ambos sistemas, sin embargo, gestionadas adecuadamente pueden suponer un beneficio para ambos, de este modo, las femtoceldas podrían llegar a convertirse en un componente esencial en las redes de telecomunicación.

Los punto de acceso femtocelda suelen tener una potencia menor de 0.1 Watt, y dan servicio a número pequeño de usuarios, en torno a un máximo de diez. Se espera que existan una gran cantidad de sistemas femtocelda dentro de entornos urbanos, debido a esta elevada densidad el espectro asignado a las femtoceldas será reutilizado continuamente.

Respecto a la gestión de interferencias, una femtocelda puede modificar cualquiera de las siguientes características:

Potencia de enlace descendente de la femtocelda

Si la femtocelda transmite a una potencia elevada, la cobertura será grande, pero existirán miembros del grupo cerrado que no tendrán servicio cerca de la femtocelda, por otro lado, si la femtocelda transmite una potencia pequeña la cobertura puede ser demasiado pequeña como para agrupar a todos los usuarios.

Ganancia del receptor femtocelda

Los equipos de cada usuario tienen una potencia de transmisión mínima, por debajo de la cual no pueden funcionar por lo que sería conveniente que la ganancia del receptor fuese lo más pequeña posible, y hacer que la femtozona sea lo más cerrada posible. Pero por otro lado, no es deseable que los terminales transmitan una potencia alta, ya que aumentaría el ruido entre la macrocelda en la que estén situados.

Potencia del enlace ascendente del equipo usuario

Si los terminales del usuario utilizan un potencia de transmisión elevada pueden generar demasiadas interferencias dentro de la femtocelda, por lo que existirá un límite de potencia que no podrán sobrepasar, sin embargo, por otro lado es necesario transmitir con una potencia suficiente para asegurar la conexión entre terminal y punto de acceso. Además, desde el punto de vista de la duración de baterías, es deseable que la potencia de transmisión del usuario sea lo más pequeña posible.

Finalmente, en la referencia [23] el 3GPP define una serie de escenarios con la finalidad de estudiar, analizar y controlar las interferencias generadas por la inserción de la tecnología femtocelda en la red móvil.

Escenario 1. Equipo del usuario HNB interfiere en enlace ascendente macrocelda

Un incremento del ruido (interferencia) en la red correspondiente a una macrocelda puede reducir considerablemente el rendimiento de ésta. Por lo tanto es necesario controlar la potencia transmitida por los terminales utilizados en las femtozonas.

3GPP propone los siguientes mecanismos para reducir las consecuencias nocivas de las interferencias:

- Tan importante como la potencia transmitida por los terminales, es el rendimiento del receptor. Por lo tanto, el equipo usuario debe ser sensible a los cambios que se puedan producir en la estación base de la femtocelda, de modo que ajusten la potencia recibida mediante un compromiso entre interferencias y calidad del sistema.
- Limitar la potencia máxima de los terminales que operen dentro de femtozonas y el aumento de ruido para HSUPA.
- En el caso de acceso abierto a cualquier usuario, permitir el cambio entre macroceldas y femtoceldas, asegurando que la potencia transmitida por los terminales genere la menor cantidad de interferencias posibles.

Escenario 2. HNB interfiere en el enlace descendente macroceldas

La antena encargada del enlace descendente de la macrocelda ofrece cobertura a un área de un radio determinado, dentro de esta zona aparecen pequeños puntos interferentes correspondientes a las femtoceldas (HNBs). Este tipo de interferencia es especialmente intensa cuando ambos sistemas utilizan frecuencias cocanal.

Los mecanismos para minimizar el impacto de este tipo de interferencia son:

- Fijar la potencia de transmisión del HNB.
- Control del comportamiento de la potencia transmitida por el HNB
- Sistemas de acceso abierto, de forma que los terminales conmuten entre las dos redes, en función de la calidad de servicio.

Escenario 3. Equipo usuario femtocelda interfiere en enlace ascendente HNB

En este caso son los terminales de la macrocelda los culpables de introducir interferencias en el enlace ascendente del Home Node B. Como sucedía en el primer escenario, los terminales que operan en la femtozona tienen una potencia de transmisión limitada, de modo que estos dispositivos son especialmente susceptibles a interferencias producidas por la macrocelda. Por lo tanto los dispositivos del sistema femtocelda están obligados a encontrar un compromiso entre la potencia necesaria para funcionar correctamente en la femtozona, y no generar grandes niveles de interferencia en la macrocelda.

Escenario 4. Macrocelda interfiere en enlace descendente de HNB

Como es de esperar, cuando una femtocelda trabaja en el interior de una macrozona, la potencia entregada por ésta producirá interferencias en los terminales de los usuarios de la femtocelda. La solución que propone 3GPP consiste en ajustar la potencia transmitida en el enlace descendente del HNB, de modo que se pueda mantener la cobertura suficiente para ofrecer servicio a los usuarios predeterminados.

Escenario 5. Usuario macrocelda interfiere en el enlace ascendente HNB

Cuando utilizamos varios HNB en un espacio reducido, tendremos que tener en cuenta la interferencia cocanal. Este tipo de interacción es especialmente importante cuando utilicemos la configuración A, ya que si tenemos una potencia de interferente grande, no se podrá disponer de ninguna referencia para fijar el límite de la potencia transmitida.

Para evitar las interferencias entre HNBS, 3GPP recomienda utilizar distintas frecuencias de portadora. A pesar de ello, será necesario utilizar técnicas de manejo de interferencias dentro de los escenarios femtocelda.

Escenario 6. HNB interfiere en el enlace descendente del otro HNB vecino

Al igual que en el caso anterior tendremos que tener en cuenta las interferencias entre femtoceldas. Especialmente en la configuración A.

Escenario 7. Terminal femtocelda y/o HNB interfiere en otros sistemas

En este caso, los terminales femtocelda interfieren en cualquier sistema de telecomunicaciones, 3GPP recomienda una distancia mínima de 20cm entre sistemas para reducir el efecto de las éstas.

Escenario 8. Otros sistemas interfieren en Terminal femtocelda y/o HNB

Se trata del mismo caso que el escenario anterior, pero ahora son los distintos sistemas de telecomunicaciones los que afectan a los dispositivos femtocelda. Las medidas recomendadas por el 3GPP son las mismas que en el escenario 7.

3.7 Futuro de las femtoceldas

El futuro de las telecomunicaciones móviles y la utilización de las femtoceldas en éstas, has sido uno de los principales temas de debate del Mobile World Congress de 2009 celebrado en Barcelona. Sin embargo, antes de comenzar veamos como han ido progresando los servicios de voz y datos:



Figura 3.11. Evolución de los servicios de voz y datos

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... 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 [13], 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.

Los problemas de cobertura se acentúan en el caso de las oficinas, históricamente oficinas de entre 5 o 9 empleados, hasta de 50 o 100 empleados no se han instalado ningún tipo de ayuda a la cobertura, como pueden ser repetidores o las picoceldas 2G. Es decir, hasta ahora este tipo de oficinas se encontraban obligadas a utilizar los macro accesos dentro de sus edificios, con los problemas que esto conlleva.

En el estudio realizado por Orange, señalan que actualmente el 70% de las empresas equipa a sus clientes con terminales específicos para la actividad empresarial, y de ellos, el 25% tiene problemas de cobertura dentro de la oficina. Finalmente, en cuanto a la penetración de las femtoceldas en entornos empresariales, destacar que el 41% está dispuesto a pagar la implantación de una femtocelda dentro de su negocio.

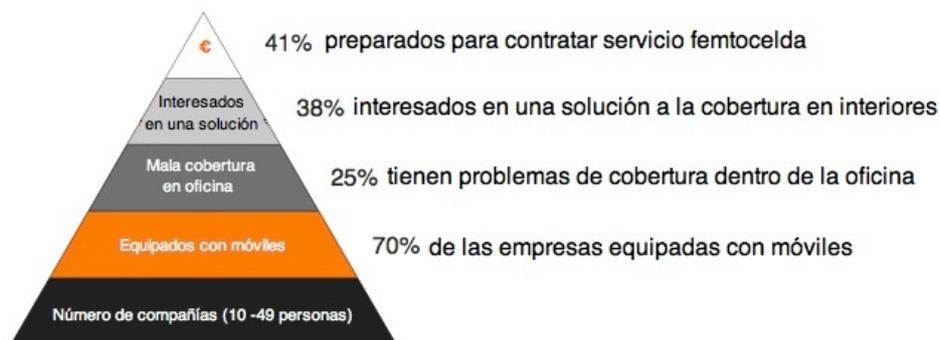


Figura 3.12. Estudios de la penetración de femtocelda en oficinas y negocios

Respecto a la repercusión de las femtoceldas en un futuro próximo, [14] estima que en 2012 habrá instalados un total de 70 millones de unidades de este tipo de dispositivo. El precio previsto para un equipo femtocelda es de aproximadamente 300 dólares, aunque se espera que en varios años esta cantidad se vea reducida en más de un 50%. Según auguran los analistas, se distribuirán un total de 40 millones de unidades en 2011 y la cifra ascenderá hasta los 70 millones estimados a finales de 2012. 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 ensayos basados en femtoceldas. Especialmente llamativo resulta el movimiento comercial de Google, que recientemente ha adquirido un gran número de acciones de la empresa Ubiquisys, la cual había realizado una apuesta firme por las femtoceldas.

Como es de esperar, la introducción de la tecnología basada en femtoceldas estará compuesta por varias fases de adopción y podrá evolucionar conforme aumente el número de unidades instaladas. Según la empresa ip.access [16], esta adopción estará compuesta por tres fases. En la primera se cubrirán los objetivos básicos de las femtoceldas, aumentar tanto la cobertura, como el ancho de banda de los servicios móviles y conseguir que las llamadas desde los domicilios sean más baratas. Durante la segunda fase se conseguirá aumentar la velocidad de transmisión de los servicios que actualmente proporciona la tecnología 3G, pero que son poco utilizados debido al bajo ancho de banda disponible, y finalmente aparecerán los nuevos servicios de la mano de 4G. 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... y por otro lado servicios orientados a la domótica, es decir, la femtocelda podrá interactuar con la televisión, el ordenador personal, la cocina...

Durante el congreso realizado en Barcelona se reiteró constantemente el uso de femtoceldas como vía para exprimir 3G en todas sus posibilidades, ya que suponen el aumento necesario en velocidad y eficiencia espectral. Si bien 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 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.

Volviendo a la empresa ip.access, ésta destaca una serie de servicios que se encuentran marginados en las comunicaciones móviles. Por un lado las redes sociales como Facebook, Twitter, Tuenti... gracias a los nuevos servicios ofrecidos podremos integrar nuestro "yo virtual" con la femtocelda, de modo que podamos estar en permanente contacto con nuestros familiares, amigos, compañeros... Otro aspecto que se beneficiará del uso de las femtoceldas es la televisión móvil y el video en directo desde el teléfono móvil. Ip.access, realizó una encuesta preguntando por la escasa utilización de servicios de televisión móvil. Las principales causas fueron la mala calidad de ésta y el elevado precio de las tarifas, sin embargo, mucha gente estaba interesada en ver la televisión en cualquier habitación de su domicilio, por ejemplo utilizar terminales con grandes pantallas cuando alguien de su familia se encuentra viendo otro canal en la televisión.

Finalmente 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 femtocelda con el nombre de "Vodafone Access Gateway", siendo la primera operadora en hacerlo en Europa. El precio de los servicios femtocelda ronda las 15 libras, regalando el punto de acceso para un periodo de contratación de dos años. Éste puede comprarse de manera independiente, con precios que oscilan entre 150 y 250 libras en función de las características. Además Vodafone ha establecido 2 tipos de servicios, uno con solo funcionalidad femtocelda para usuarios que ya tienen router ADSL y otra que integra conectividad ADSL y WiFi. En ambos casos la operadora asegura un caudal mínimo de 1 Mbps. En España existe actualmente una prueba piloto con más de 100 empresas involucradas, y se espera que la cantidad mensual del servicios femtocelda se encuentre entre 10 y 15 euros al mes, independientemente del servicio ADSL contratado.

Respecto al hardware encargado de prestar servicios femtocelda, destacar la aparición de los primeros dispositivos adaptados para el uso de femtoceldas, por ejemplo, el Netgear DVG834GH que incluye un MODEM ADSL2+, WiFi, un switch Ethernet 10/100 de 4 puertos, tecnología femtocelda 3G y doble firewall.

A continuación presentamos sus especificaciones técnicas:

- Hardware
 - 3G Interfaz radio (lu sobre IP opcional): UMTS, WCDMA, FDD
 - 3GPP release 5 (2005-6)
 - SIM slot
 - Band I (receptor 1920 MHz - 1980 MHz, transmisor 2110 MHz -2170 MHz)
 - Potencia de Transmisión: 10dB máximo
 - Max UEs (Modo idle): 20
 - Max UEs (Mode activo): 4
 - Radio de la celda: 200m máximo
- UMTS
 - IP tiempo fuente, macro tiempo fuente, DL modo monitor, HSDPA 3.6, HSDPA 7.2
- Servicios
 - Localización de servicios de red, descarga de datos,.
- Seguridad
 - SIM/USIM, IMEI, túnel seguro, túnel geográfico, bloqueo de red, cortafuegos integrado
- Red
 - IETF SIP
 - Soporte RAN GW (lu sobre IP), soporte básico SS, soporte a llamadas de emergencia, gestión remota, CAC básico, DSCP marking,
 - UMA lu sobre IP, soporte customizable para interfaces GW adicionales



Podemos concluir que la tecnología basada en femtoceldas ya es un hecho, y parece tener un futuro prometedor. El mercado de las telecomunicaciones se encuentra expectante de cuales serán los siguientes pasos que tomen los operadores móviles, y cuando se va a producir una campaña a gran escala para introducir las femtoceldas en los hogares. Destacar la importancia de ésta tecnología como base para la aparición de servicios de cuarta generación.

Capítulo 4

Modelos de Propagación y Parámetros de Simulación

Modelos de propagación y parámetros de simulación

4.1. Introducción

Durante el siguiente capítulo realizaremos un breve recorrido de los modelos de propagación utilizados a lo largo de todo el estudio. Los modelos de propagación son la herramienta que utilizamos para predecir de manera aproximada las pérdidas que se producen en un ambiente determinado. Estos modelos se basan en mediciones realizadas en lugares de interés, es decir, se realizan miles de medidas y se obtiene un promedio de éstas, una vez determinada la expresión a utilizar, se pueden fijar unos valores a cada uno de los parámetros. Por lo tanto, cada modelo sirve para un tipo de entorno, existen modelos indicados para escenarios interiores, residenciales o comerciales, escenarios urbanos de alta densidad, edificios de oficinas, para distancias superiores a 1 kilómetro...Depende de la pericia y experiencia del ingeniero decidir cual se ajusta mejor a cada caso.

Finalmente mostraremos un resumen de los principales parámetros de simulación supuestos a lo largo del proyecto. En este sentido, destacar que los valores son meramente orientativos, en algunas situaciones hemos decidido realizar pequeños cambios debido a las características del escenario estudiado, que se indicarán en el apartado correspondiente.

4.2. Modelo Log-Normal

El modelo log-normal es uno de los más simples y utilizados. Se basa en la idea de que las señales, ya sea dentro de escenarios urbanos, suburbanos, interiores... se propagan en entornos irregulares y se ven obligadas a atravesar, difractarse o reflejarse en gran cantidad de obstáculos hasta llegar a su destino. El modelo log-normal considera cada una de estas pérdidas como aleatorias e independientes, de modo que aplicando el teorema central del límite se puede concluir que las pérdidas totales, en decibelios, son una variable aleatoria con distribución normal. Dichas pérdidas se podrán modelar de acuerdo a la siguiente ley:

$$L(dB) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

Donde:

- n : Exponente de propagación. Depende del entorno y del tipo de materiales
- $PL(d_0)$: Base de las pérdidas
- X_σ : Variable normal de media nula y desviación estándar σ

En la Tabla 4.1 mostramos los valores de los parámetros del modelo log-normal para algunos de los entornos más utilizados. Estos son:

Entorno	Frecuencia	n	L(do)
Espacio Libre	-	2	-
Urbano	1900	3,5	28
Urbano Baja Densidad	1900	3,76	15,3
Edificio Común	1900	2,8	12,9
Edificio Común (1 planta)	1900	4,19	5,1
Oficinas	1900	3,7	12,8

Tabla 4.1. Parámetros del modelo log-normal para distintos escenarios

4.3. Modelo Cost231-Okumura Hata

El modelo COST231-Okumura Hata 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. Su aplicación está dirigida a entornos exteriores, en casos en los que la distancia entre estación base y terminal son superiores al kilómetro por lo que suele utilizarse en herramientas de planificación de cobertura. La expresión de las pérdidas de propagación viene dada por:

$$L(\text{dB}) = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \log(d) - F(h_M) + C$$

Donde:

$$F(h_M) = \begin{cases} (1.1 \log(f) - 0.7) h_M - (1.56 \log(f)) - 0,8 & \text{ciudades pequeñas y medianas} \\ 3.2(\log(11.75 h_M))^2 - 4.97 & \text{ciudades grandes} \end{cases}$$

El factor de corrección de clutter viene dado por:

$$C = \begin{cases} 0\text{dB} & \text{ciudades medianas y áreas suburbanas} \\ 3\text{dB} & \text{ciudades grandes} \end{cases}$$

Donde los parámetros vienen dados por:

- f : Frecuencia [MHz]
- h_b : Altura de la estación base respecto al nivel del suelo [m]
- h_M : Altura de la estación móvil respecto al nivel del suelo [m]
- d : Distancia entre estación base y estación móvil [km]

Los resultados obtenidos mediante el modelo COST231-Okumura Hata son válidos siempre y cuando los anteriores parámetros se encuentren dentro de los siguientes rangos:

$$150\text{MHz} < \mathbf{f} < 2000 \text{ MHz}$$

$$30\text{m} \leq \mathbf{h}_b \leq 200\text{m}$$

$$1\text{m} \leq \mathbf{h}_M \leq 10\text{m}$$

$$\mathbf{d} > 1\text{km}$$

Destacar que estas expresiones cubren un rango de frecuencias de hasta 2000 MHz, sin embargo vamos a considerar que siguen siendo validas para 2100 MHz, donde se encuentra la frecuencia del enlace descendente UMTS.

En la siguiente figura podemos observar la evolución del modelo COST231-Okumura Hata en un rango de hasta 10 km.

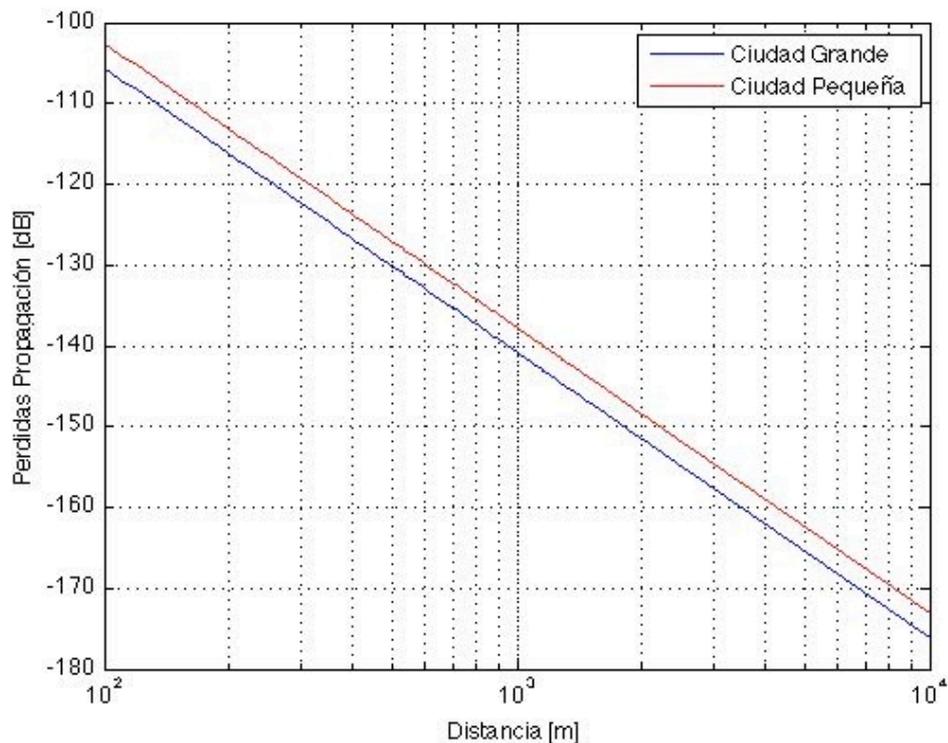


Figura 4.1. Pérdidas de propagación. Modelo Cost231-Okumura Hata

4.4. Modelo ITU P.1411

Se trata de un modelo para sistemas de radiocomunicaciones exteriores de corto alcance, su uso se encuentra limitado a un rango de 5 kilómetros y se recomienda no utilizarlo a partir de distancias superiores a un kilómetro.

Para trayectos de longitud inferior a 1 kilómetro las pérdidas por propagación se deben principalmente a construcciones y vegetación, más que por las variaciones de la elevación del terreno. Además la mayoría de enlaces de corto alcance suelen darse en áreas urbanas y suburbanas, donde el terminal se encuentra en manos de un peatón o situados en un vehículo.

El modelo ITU P1411 define un límite superior e inferior de pérdidas de propagación para una distancia dada según las siguientes expresiones:

Límite inferior:

$$L_{LoS,l}(dB) = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for } d \leq R_{bp} \\ 40 \log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for } d > R_{bp} \end{cases}$$

Límite superior:

$$L_{LoS,u}(dB) = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for } d \leq R_{bp} \\ 40 \log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for } d > R_{bp} \end{cases}$$

El punto de ruptura es la distancia a partir de la tasa de variación de las pérdidas por propagación aumenta. Éste viene dado por:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda}$$

Donde las pérdidas básicas de transmisión viene determinadas por la siguiente expresión:

$$L_{bp}(dB) = \left| 20 \log\left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m}\right) \right|$$

El resto de parámetros vienen definidos por:

- λ : Longitud de onda [m]
- h_b : Altura de la estación base respecto al nivel del suelo [m]
- h_m : Altura de la estación móvil respecto al nivel del suelo [m]
- d : Distancia entre estación base y estación móvil [m]

Finalmente podemos observar el comportamiento del modelo ITU P.1411 en la siguiente Figura 4.2:

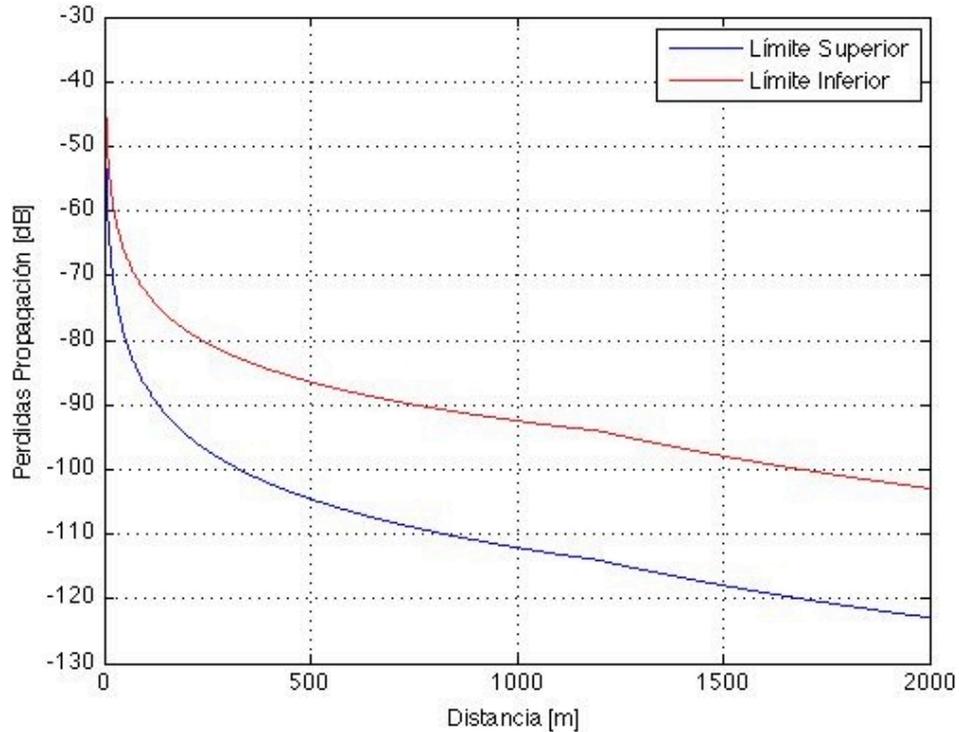


Figura 4.2. Pérdidas de propagación. Modelo ITU P.1411

4.5. Modelo ITU-R P.1238

El modelo ITU-R P1238 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... elementos representados por el índice N . Esta recomendación define tres escenarios diferentes, residencial, oficina y comercial.

Destacar que a diferencia de otros modelos más complejos, no requiere conocimiento alguno del número de paredes entre estación base y estación móvil. Las pérdidas por propagación vienen dadas por:

$$L_{total}(dB) = 20 \log(f) + N \log(d) + L_f(n) - 28$$

Donde:

- N : Coeficiente de pérdida de potencia frente a distancia
- f : Frecuencia (MHz)
- d : Distancia entre estación base y estación móvil ($d > 1m$)
- 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
Residencial	28	4n
Oficina	30	15 + 4(n-1)
Comercial	22	6 + 3(n-1)

Tabla 4.2. Parámetros del modelo ITU-R P.1238

En la Figura 4.3 mostramos la simulaciones realizadas para los distintos escenarios contemplados en el modelo ITU-R P1238:

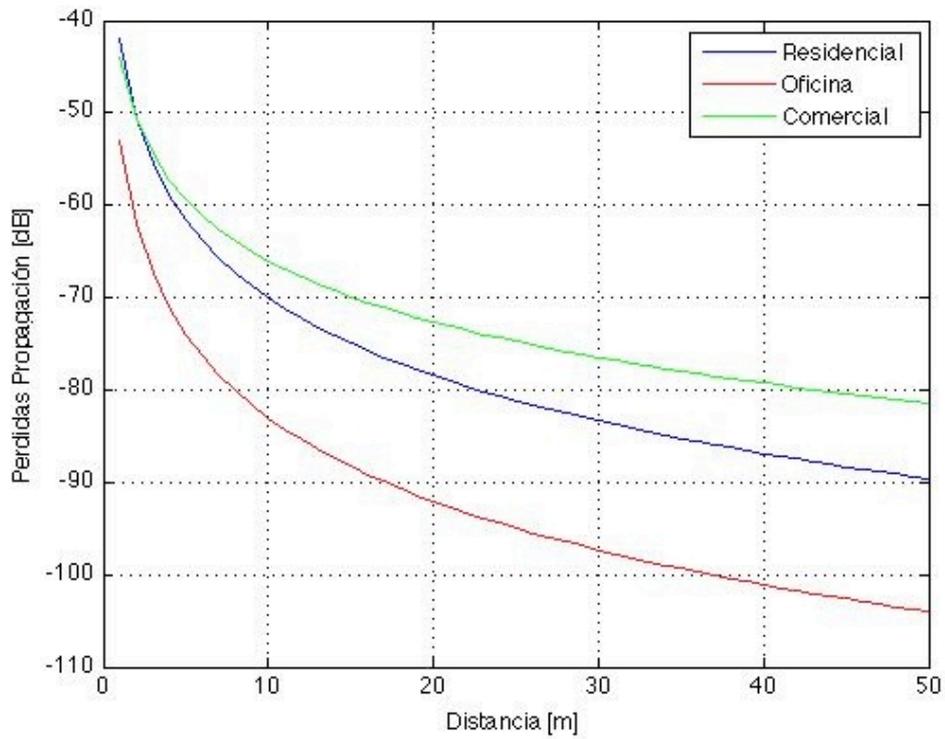


Figura 4.3. Pérdidas de propagación. Modelo ITU-R P1238

4.6. Parámetros de simulación

En la Tabla 4.3 encontramos los principales parámetros de simulación considerados a lo largo del proyecto:

Parámetro	Valor
Pérdidas de penetración en pared	12 dB
Pérdidas de penetración en ventana	5 dB
Máxima potencia de transmisión de la antena macro Nodo B	43 dBm
Máxima potencia de transmisión de la antena micro Nodo B	38 dBm
Ganancia de macro Nodo B	17 dBi
Pérdidas en macro Nodo B por alimentadores	3 dB
Ganancia de micro Nodo B	2 dBi
Pérdidas en micro Nodo B por alimentadores	1 dB
Sensibilidad de la antena Nodo B	-111 dBm
Sensibilidad de la femtocelda	-105 dBm
Límite de la cobertura macrocelda	RSCP -103 dBm & Ec/No -20 dB
Figura de ruido de la femtocelda	8 o 12 dB
Carga de la antena macro Nodo B	50%
Carga de la femtocelda	50%
Potencia máxima de transmisión en terminales	De 0 hasta 21 dBm []
Potencia máxima de transmisión en femtocelda	10 dBm, 15 dBm, 21 dBm
Modelo pérdidas interior - interior	ITU P.1238
Modelo pérdidas interior - exterior	ITU P.1411 + Perdidas Pared/Ventana
Modelo pérdidas exterior-exterior	Cost231- Hata para macroceldas lejanas ITU P.1411 para macroceldas cercanas
Modelo pérdidas exterior - interior	Cost231 - Hata + Pérdidas Pared/Ventana

Tabla 4.3. Parámetros de simulación

Capítulo 5

Gestión de Interferencias

Gestión de interferencias

5.1. Introducción

A lo largo de la referencia [24], el Femto Forum ha definido diez tipos de escenarios para explorar los límites de funcionamiento tanto de los punto de acceso femtocelda, como de los terminales que operen dentro de su cobertura. Durante el siguiente capítulo vamos a realizar una serie de simulaciones de dichos escenarios, centrándonos en el cálculo del área de cobertura ofrecida por la femtocelda y en la calidad de los servicios de voz y datos que ésta puede ofrecer en cada caso. En la Figura 5.1 mostramos una representación de los enlaces entre puntos de acceso y terminales para cada contexto.

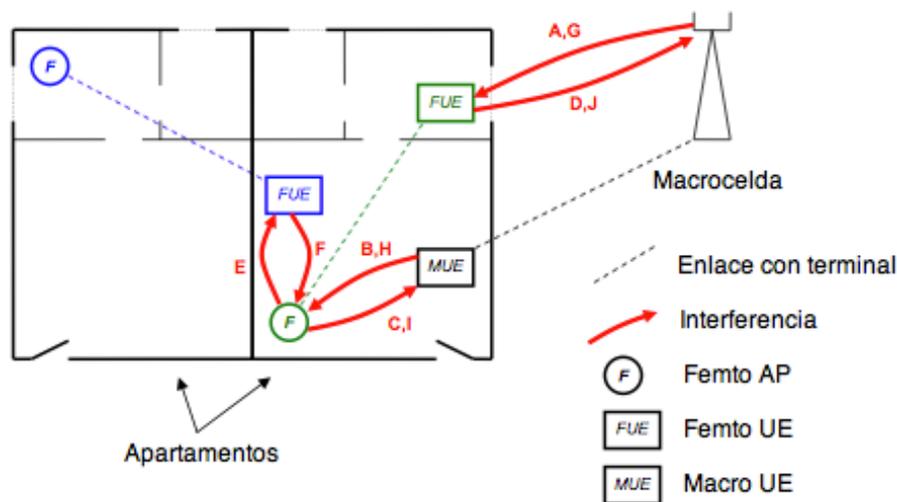


Figura 5.1. Representación de los diversos enlaces simulados

Destacar que en los escenarios desde A a F suponemos interferencia cocanal, mientras que en los casos de G a J dicha interferencia proviene de un canal adyacente. Podemos encontrar una referencia adicional en el estudio del 3GPP [23], estudiada en el apartado 5.6, donde los escenarios simulados en este proyecto corresponden a los escenarios de 1 al 6 de dicho documento. A continuación realizamos una breve descripción de cada uno de los escenarios de simulación.

Escenario A. Enlace descendente de un macrocelda interfiere en el receptor de un equipo usuario de una femtocelda.

El terminal femtocelda se encuentra situado encima de una mesa al lado de la ventana, de modo que tiene visión directa con la antena macro Nodo B situada a una distancia de 30 metros. La antena macrocelda se encuentra completamente cargada y el terminal se sitúa en el límite de su femtozona. Este tipo de configuración permite que el impacto de las interferencias sea máximo.

Escenario B. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el enlace ascendente del receptor femtocelda.

Un punto de acceso femtocelda FAP opera en el centro de la vivienda, dicha localización se encuentra en el filo de la cobertura ofrecida por una antena macro Nodo B. Existen dos terminales, el primero de ellos (MUE) conectado con la macrocelda y muy cercano al punto de acceso, mientras que el segundo (FUE) se sitúa en el límite de la femtozona y conectado con FAP. En un momento dado, el equipo usuario MUE realiza un llamada de modo que necesita transmitir con el máximo de su potencia disponible para contactar con la macrocelda.

Escenario C. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el receptor del equipo usuario de la macrocelda.

En este caso el usuario macrocelda MUE se encuentra en filo de su cobertura y muy cercano a un punto de acceso FAP. La femtocelda se encuentra completamente cargada de modo que el enlace descendente de ésta interfiere en el receptor del terminal MUE.

Escenario D. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el receptor de la antena macrocelda (Nodo B)

Un usuario femtocelda se encuentra junto a la ventana de un apartamento, en esta situación dicho terminal tiene visión directa con la antena macro Nodo B que se encuentra aproximadamente a 30 metros de distancia. Respecto a la femtocelda el equipo FUE se sitúa en el límite, de modo que para contactar con el punto de acceso FAP debe utilizar el máximo de potencia posible. Esta potencia es recibida por la antena macro Nodo B aumentando el nivel de ruido en su receptor.

Escenario E. Enlace Descendente de una femtocelda interfiere en el receptor de un femto punto de acceso vecino

Dos apartamentos adyacentes (FAP1 y FAP2) están equipados con sendos equipos femtocelda creando cada uno un grupo cerrado de usuarios. El usuario FAP2 realiza una visita a su vecino FAP1 situando su terminal muy cercano a dicho punto de acceso y en el filo de su femtozona. Cuando el usuario FUE1 realiza una llamada, la interferencia recibida en el terminal FUE2 con origen en el punto de acceso será máxima.

Escenario F. Enlace ascendente de un terminal femtocelda vecino interfiere en el receptor de un punto de acceso FAP.

Al igual que en el escenario E, existen dos apartamentos adyacentes utilizando tecnología femtocelda. El usuario de FAP2 se encuentra en la vivienda de su vecino, situándose en el límite de su cobertura y muy cercano al punto de acceso FAP1. El terminal FUE2 realiza una llamada aplicando toda su potencia disponible, esta señal será captada por el receptor de FAP1 como interferencia.

Escenario G. Enlace descendente de una macrocelda interfiere en el canal adyacente del receptor del equipo usuario de una femtocelda.

El esquema de este escenario es idéntico al del escenario A, con la salvedad de que ahora la interferencia se recibe desde el canal adyacente. Al igual que antes, el equipo usuario femtocelda se sitúa en una mesa junto a la venta recibiendo señal directa de la antena macro Nodo B. La macrocelda se encuentra completamente cargada y el usuario FUE en el límite de su femto cobertura.

Escenario H. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el canal adyacente del enlace ascendente del receptor femtocelda.

Como sucedía en el escenario B un usuario que no tiene acceso a la femtocelda realiza una llamada desde un punto muy cercano al equipo FAP. Dicho usuario se encuentra en el filo de su cobertura macrocelda de modo que transmite con el máximo de potencia, la señal generada llegará al receptor femtocelda desde el canal adyacente en el que ésta opera.

Escenario I. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor del equipo usuario de la macrocelda.

Dos usuarios, MUE y FUE, se encuentran en el mismo apartamento y ambos en el límite de sus respectivas coberturas. La femtocelda se ve obligada a transmitir a plena potencia interfiriendo en el receptor del terminal MUE desde su canal adyacente.

Escenario J. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor de la antena macrocelda (Nodo B)

Un equipo usuario femtocelda se encuentra localizado junto a la ventana de una vivienda y en el borde de su cobertura. El enlace ascendente del terminal interferirá en el canal adyacente del receptor de una antena macro Nodo B que se encuentra a una distancia de 30 metros y con visión directa a la vivienda.

En la Tabla 5.1 mostramos un resumen de la relación entre agresor y víctima en cada uno de nuestros escenarios:

		Víctima				
		Femto UE DL Rx	Femto AP UL Rx	Macro UE DL Rx	Macro Nodo B UL Rx	Femto UE Vecino DL Rx
Agresor	Macro Nodo B DL Tx	A, G				
	Macro UE UL Tx		B, H			
	Femto AP DL Tx			C, I		E
	Femto UE UL Tx				D, J	
	Femto UE vecino UL Tx		F			

Tabla 5.1: Relación víctima - agresor para cada escenario

5.2. Escenario A. Enlace descendente de una macrocelda interfiere en el receptor de un equipo usuario femtocelda

Descripción y objetivos

Un punto de acceso femtocelda se encuentra situado junto a la ventana de una vivienda, de modo que existe visión directa con en enlace descendente de la macrocelda, la cual se encuentra situada a una distancia de 30 metros aproximadamente. La macrocelda transmite a plena potencia y el equipo usuario de la femtocelda (FUE) se sitúa en el límite de la cobertura ofrecida por su punto de acceso (FAP). Por lo tanto, teniendo en cuenta estas condiciones la potencia interferente será máxima.

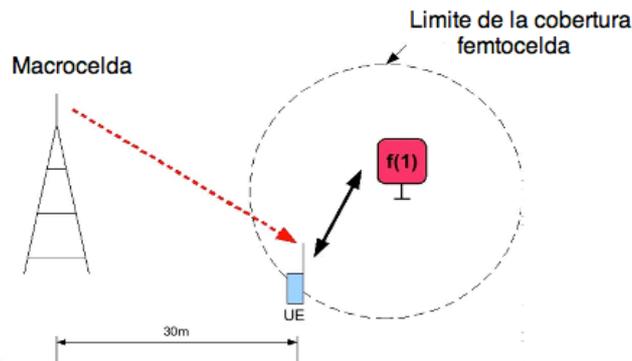


Figura 5.A.1. Escenario A

El objetivo de este escenario es determinar los servicios que una femtocelda puede ofrecer a un equipo usuario cuando se encuentra en una situación tan desfavorable como la descrita anteriormente. Comenzaremos realizando un análisis del rango de distancia en el que un usuario puede detectar la cobertura femtocelda y realizar una comunicación fiable con ella en función de la potencia del canal de pilotos P-CPICH. Los pasos a realizar serán:

- Suponer un valor de potencia transmitida en el canal P-CPICH, tanto en la macro como en la femtocelda.
- Determinar la potencia que recibe el equipo usuario originada en la macrocelda
- Una vez conocido el nivel de interferencia, determinar la distancia a partir de la cual la relación señal a interferencia es suficiente para que el usuario pueda detectar la cobertura ofrecida por el punto de acceso.

El segundo paso consiste en precisar los servicios que la femtocelda puede ofrecer cuando el usuario se encuentra en el límite de su cobertura. En este caso llevaremos a cabo el siguiente proceso:

- Para servicios vocales, determinar la cantidad de potencia necesaria para realizar una llamada de voz cuando nos encontramos con un nivel de interferencia como el calculado en el primer paso.
- En el caso de transferencia de datos, calcular la relación E_c/N_0 que podemos obtener cuando asignamos el resto de potencia a servicios HSDPA, una vez determinado, obtendremos la tasa binaria disponible en función de la distancia entre punto de acceso y equipo usuario

Interferencia originada en una macrocelda

Procedemos a evaluar la máxima cobertura que puede ofrecer una femtocelda en el escenario planteado. Para el enlace entre estación base de la macrocelda y equipo usuario necesitaremos un modelo de propagación caracterizado a exteriores, que se adapte a distancias cortas y escenarios urbanos, de modo que aplicaremos el modelo establecido por la recomendación ITU P-1411, además será necesario añadir un valor de pérdidas de penetración al atravesar la ventana de la vivienda donde se encuentra el usuario. Respecto al modelo de propagación utilizado para modelar las pérdidas entre punto de acceso y terminal, tendremos que aplicar un modelo de interiores, en nuestro caso utilizaremos la recomendación ITU-R P.1238 aplicada a escenarios residenciales y suponiendo que todo el sistema se encuentra en la misma planta del edificio.

Los parámetros de la antena encargada de ofrecer servicios macrocelda vienen definidos en la Tabla 5.A.1.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia máxima disponible	43	dBm	$P_{tx\ max}$
Utilización de potencia del macro nodoB	75	%	U_t
Potencia transmitida	41,75	dBm	$P_{tx} = P_{tx\ max} + 10 \log(0.75)$
Ganancia de la antena	17	dBi	G_m
Pérdidas en alimentadores y cableado	3	dB	L_c
Potencia isotrópica efectiva	55,75	dBm	$EIRP = P_{tx} + G_m - L_c$

Tabla 5.A.1. Parámetros de la antena macro Nodo B

Respecto al enlace entre antena macro nodo B y equipo terminal realizaremos las suposiciones detalladas en la Tabla 5.A.2. Destacar que al aplicar el modelo ITU P1411 dispondremos de un intervalo de pérdidas de propagación definido por el límite superior e inferior, dando lugar a un valor máximo y mínimo de potencia interferente recibida en el equipo usuario.

	Valor	Unidades	Comentarios
Distancia entre macro nodo B y terminal	30	m	d_{mu}
Altura de la antena de la macrocelda	25	m	h_b
Altura de equipo usuario	1,5	m	h_m
Pérdidas al atravesar una ventana	5	dB	$L_{ventana}$
Pérdidas de Propagación	67,4	dB	PL_{min}
	79,7		PL_{max}
Ganancia del equipo usuario	0	dBi	G_{ue}

	Valor	Unidades	Comentarios
Pérdidas en conectores y cableado	3	dBi	L_{cu}
Potencia recibida en el terminal procedente de la antena macro nodo B	-14,65	dBm	$Pr_{x_{max}}$
	-26,93		$Pr_{x_{min}}$

Tabla 5.A.2. Balance de enlace entre antena macro Nodo B y terminal UE

A continuación definimos los parámetros del punto de acceso femtocelda, tendremos que hacer distinción entre los tres tipos de potencia de transmisión disponibles, 10dBm, 15dBm y 21 dBm.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia máxima transmitida por la femtocelda	10	dBm	$P_{tx_{fap}}$
	15		
	21		
Ganancia de la antena femtocelda	0	dBi	G_{fap}
Pérdidas en la femtocelda	1	dB	$L_{C_{fap}}$
Máximo EIRP transmitido	9	dBm	$EIRP_{fap} = P_{Lx_{fap}} + G_{fap} + L_{C_{fap}}$
	14		
	20		
Potencia asignada al canal P-CPICH	10	%	p_{CPICH}
EIRP transmitida en el canal P-CPICH	-1	dBm	$EIRP_{P-CPICH} = EIRP_{fap} p_{CPICH}$
	4		
	10		

Tabla 5.A.3. Parámetros del punto de acceso femtocelda

Finalmente debemos tener en cuenta la necesidad de un valor mínimo de calidad de canal para que el equipo usuario pueda detectar y conectar con el punto de acceso femtocelda. Para encontrar el rango dentro del cual se cumple esta condición, vamos a suponer que basta con que la potencia recibida en el canal P-CPICH se encuentre 20 dB por debajo de la potencia recibida de la macrocelda.

Una vez definidos todos los parámetros de nuestro sistema, en la Figura 5.A.2 dibujamos las curvas de variación de potencia recibida desde el punto de acceso en FUE frente a la distancia que existe entre ambos para cada clase de femtocelda. A fin de mostrar la distancia límite a partir de la cual el terminal puede detectar la cobertura femtocelda, también será necesario mostrar la potencia recibida originada en la antena de la macrocelda y su valor 20 dB por debajo, a partir del cual será imposible llevar a cabo dicha detección.

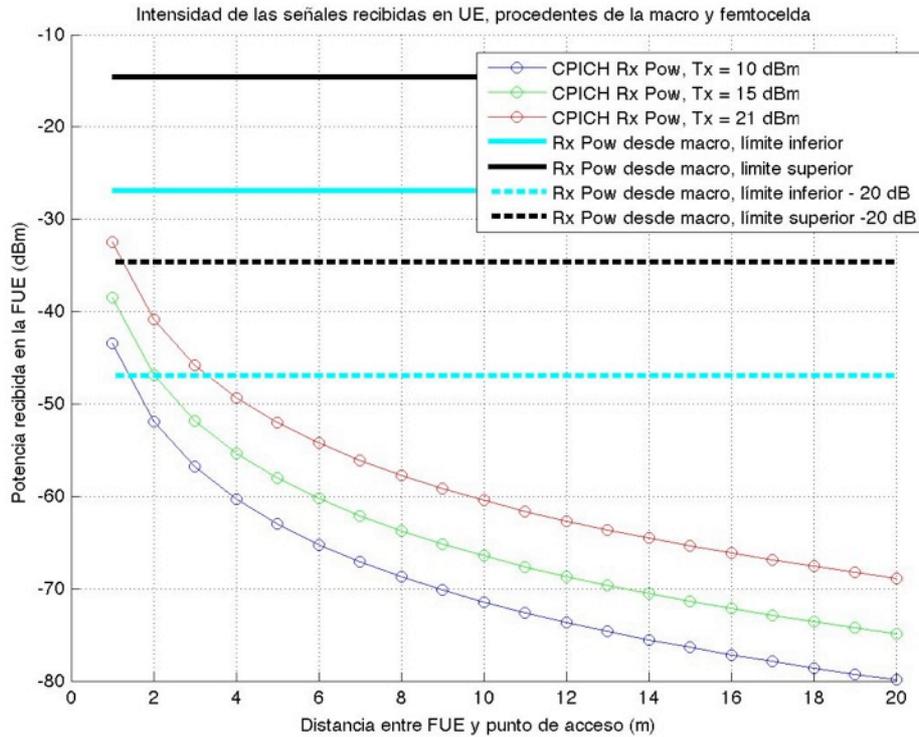


Figura 5.A.2. Potencia recibida en FUE en función de la distancia entre FAP y terminal

Podemos observar que la potencia recibida de la macrocelda es bastante elevada respecto a la emitida por la femtocelda. Para el caso del sistema más potente, 21 dBm, comprobamos que la distancia al terminal no puede ser superior de 4 metros en el límite superior de las pérdidas de propagación (ITU P1411) y de apenas 1,5 metros para el límite inferior. En el caso de sistemas menos potentes estas distancias son mucho más pequeñas, llegando a imposibilitar la detección de la cobertura femtocelda independientemente de la distancia entre punto de acceso y terminal.

El siguiente paso consiste en evaluar los servicios de voz y datos que una femtocelda puede ofrecer cuando el terminal se encuentra fuertemente afectado por la potencia recibida de una macrocelda. Comenzaremos definiendo los parámetros necesarios para realizar una conexión de voz exitosa:

	Valor	Unidades	Comentarios
Ancho de banda	3,84E+06	cps	W
Tasa binaria necesaria para una llamada de voz	12,2	Kbps	R
Relación señal a ruido más interferencia necesaria para una llamada de voz	7	dB	$\frac{Eb}{No + Io}$
Relación portadora a ruido más interferencia necesaria para una llamada de voz	-18	dB	$\frac{Ec}{No + Io} = \frac{Eb}{No + Io} - 10 \log \left(\frac{W}{R} \right)$

Tabla 5.A.4. Relación Ec/No necesaria para una llamada de voz

Respecto a la transferencia de datos HSDPA, supondremos que una femtocelda reserva un 80% de su potencia total, de modo que para conseguir una tasa de 200 Kbps será necesario una relación portadora a ruido más interferencia superior a -11 dB de acuerdo con la siguiente ecuación obtenida en la referencia [26]:

$$R_{HS, Mbps} = 3.84 \begin{cases} 0, & CIR < 10^{-1.4} \\ \log_2 \left(1 + \frac{CIR}{2} \right), & CIR \geq 10^{-1.4} \end{cases}$$

Donde el valor de CIR corresponde a la calidad de nuestro canal, es decir, a la relación portadora a ruido más interferencia. Destacar la existencia un límite superior de capacidad de 14.4 Mbps debido al tipo de terminales utilizados.

Tras observar los resultados obtenidos, podemos concluir que la utilización de un sistema femtocelda en un escenario en el que el terminal tiene visión directa con una antena macrocelda a una distancia de 30 metros no aporta grandes beneficios. Sin embargo la utilización de esta tecnología puede estar justificada cuando el usuario se encuentra aislado de la macro cobertura como puede ser el caso de naves industriales con techo metálico o edificios subterráneos.

Escenario extendido. Interferencia macrocelda

Resulta interesante extender el escenario planteado para casos en los que la distancia entre macro y femtocelda son mayores de 30 metros. En este caso seguiremos utilizando las suposiciones realizadas anteriormente como la utilización del modelo ITU P.1411 para modelar las pérdidas de propagación en espacio libre o la situación del terminal, el cual se sigue encontrando junto a la ventana manteniendo visión directa con la macrocelda.

En este apartado nos centraremos en los servicios HSDPA, concretamente en la tasa binaria que nuestro sistema puede ofrecer en dicho escenario. Aplicando la fórmula de la referencia [42] la tasa máxima de datos viene definida por el valor de SINR:

$$SINR = SF \frac{P_{HS-DSCH}}{(1 - \alpha)P_{propia} + P_{otros} + P_{ruido}}$$

Donde:

- SF es el factor de ensanchamiento
- $P_{HS-DSCH}$ Potencia recibida del HS-DSCH "High Speed Downlink Shared Channel" sumando todos los códigos activos
- P_{propia} Potencia interferente recibida de nuestra propia celda
- α Factor de ortogonalidad.
- P_{otros} Potencia interferente de otras celdas interferentes
- P_{ruido} Valor de potencia de ruido en el receptor

A la hora de realizar la simulación hemos supuesto una potencia de 10 dBm en el canal HS-DSCH y un factor de ortogonalidad total ($\alpha = 1$). En la Figura 5.A.3 mostramos la variación de tasa binaria disponible en función de la distancia entre FAP y terminal para varios caso de potencia interferente. Lo primero que nos llama la atención es la diferencia que existe al utilizar el nivel superior o inferior de nuestro modelo de pérdidas, ésta puede llegar a

ser de hasta un orden de magnitud para la misma potencia femtocelda recibida. Por lo tanto cabe esperar una variación muy grande en función de factores externos que puedan aumentar o disminuir el nivel de potencia interferente recibida por cada usuario. Respecto a los resultados numéricos, cuando la antenna macro Nodo B se encuentra a una distancia superior a 500 metros, la femtocelda puede asegurar una tasa binaria de 1 Mbps si el terminal se encuentra a menos 5 metros del punto FAP, y en torno a 100 Kbps cuando ésta distancia es de 10 metros. Para los casos en los que la cercanía con la antenna macrocelda es mayor las prestaciones bajan considerablemente, llegando a ser necesario una separación mínima de 5 metros entre punto de acceso y usuario para ofrecer tasas superiores a 100 Kbps.

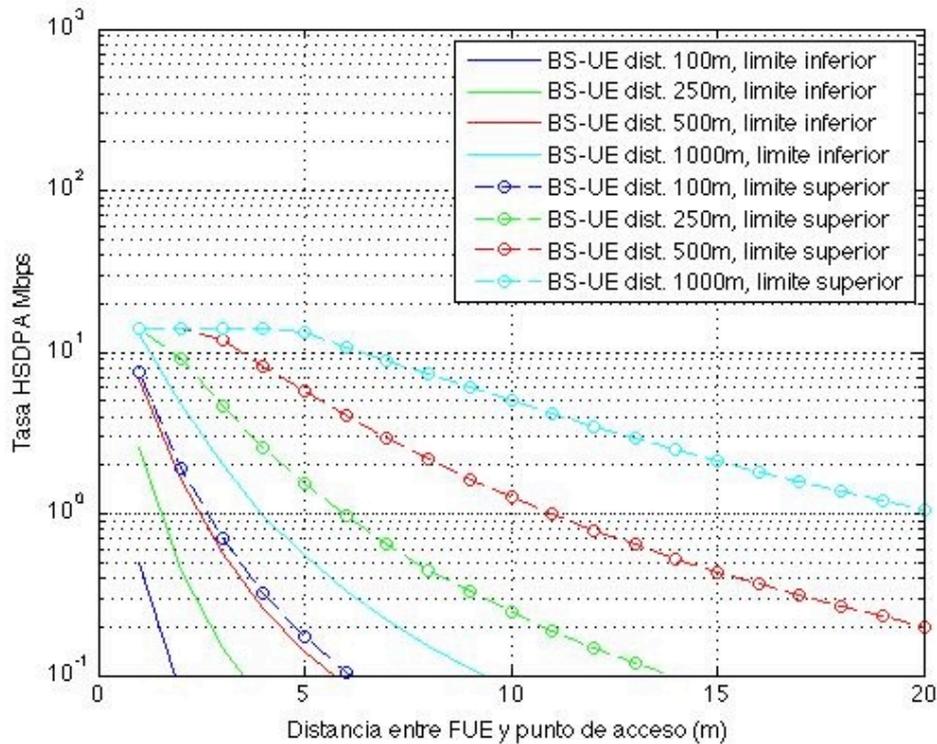


Figura 5.A.3. Tasa binaria HSDPA en función de la distancia entre FUE y FAP (caso macrocelda)

Interferencia originada en una microcelda

Hasta ahora hemos analizado el efecto en un sistema femtocelda cuando el usuario recibe potencia interferente originada en una macrocelda. Tras realizar varias simulaciones, hemos comprobado que esta interferencia afecta de manera grave a las prestaciones de nuestro sistema, de hecho, para el valor más elevado de potencia disponible en el punto de acceso, será necesario que el terminal FUE se encuentre a una distancia menor de cuatro metros. Además, analizando situaciones en las que la antenna que da servicio a la macrocelda se encuentre situada a distancias relativamente lejanas, superiores a 100 m, la tasa de datos ofrecida desciende drásticamente en función de la distancia entre terminal y estación base. Por lo tanto la utilización masiva de sistemas femtocelda en este tipo de escenarios no resulta beneficiosa, tan solo tendría sentido en situaciones concretas de aislamiento de la señal UMTS.

La causa del bajo rendimiento obtenido en el escenario anterior se debe a que hemos desarrollado un entorno exageradamente agresivo, que resulta muy improbable que se de en una situación real. Una situación más realista y que se adapte a las condiciones urbanas en

las que se espera que se implanten los sistemas femtocelda, consiste en sustituir una macro por una microcelda, de modo que la potencia interferente será mucho menor. Procedemos entonces a desarrollar los mismos pasos para determinar la cobertura y servicios disponibles cuando la interferencia proviene de una antena típica en entornos urbanos.

En este caso sustituiremos los parámetros de la antena macro nodo B por valores de potencia y ganancia más pequeños, de modo que llegaremos a reducir la potencia isotrópica efectiva en 15 dB.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia máxima disponible	38	dBm	$P_{tx\ max}$
Utilización de potencia del nodo B	75	%	U_t
Potencia transmitida	36,8	dBm	$P_{tx} = P_{tx\ max} + 10\log(0.75)$
Ganancia de la antena	2	dBi	G_m
Pérdidas en alimentadores y cableado	1	dB	L_c
Potencia isotrópica efectiva	37,8	dBm	$EIRP = P_{tx} + G_m - L_c$

Tabla 5.A.5. Parámetros de la antena microcelda

Respecto al enlace entre macrocelda y equipo usuario seguiremos haciendo las mismo suposiciones, sin embargo tal y como era de esperar, obtendremos una potencia interferente menor.

	Valor	Unidades	Comentarios
Distancia entre macro nodo B y terminal	30	m	d_{mu}
Altura de la antena de la macrocelda	25	m	h_b
Altura de equipo usuario	1,5	m	h_m
Pérdidas al atravesar una ventana	5	dB	$L_{ventana}$
Pérdidas de Propagación	67,4	dB	PL_{min}
	79,7		PL_{max}
Ganancia del equipo usuario	0	dBi	G_{ue}
Pérdidas en conectores y cableado	3	dBi	L_{cu}
Potencia recibida en el terminal procedente de la antena macro nodo B	-32,65	dBm	Prx_{max}
	-44,9		Prx_{min}

Tabla 5.A.6. Balance de enlace entre antena microcelda y terminal UE

Realizamos la misma simulación que en la Figura 5.A.2 con los nuevos parámetros obteniendo los siguientes resultados:

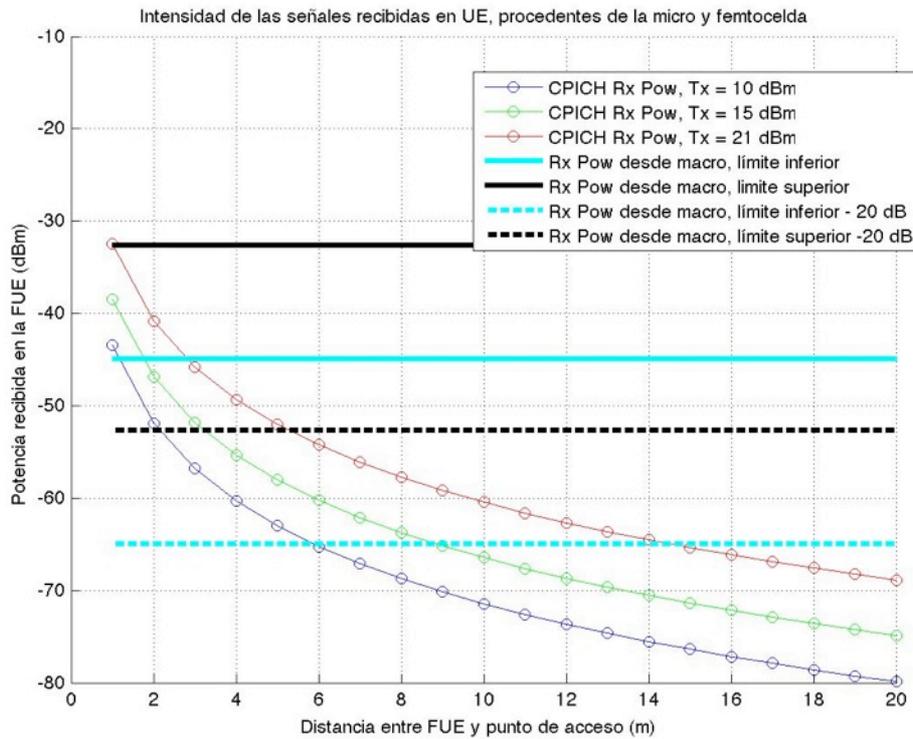


Figura 5.A.4. Potencia recibida en FUE en función de la distancia entre FAP y terminal

Podemos observar como ahora la potencia recibida de la microcelda es menor que en la Figura 5.A.2. Al igual que antes, consideramos que la potencia necesaria en el canal P-CPICH para detectar y conectar con el punto de acceso de la femtocelda debe ser 20 dBm por debajo del nivel de interferencia recibida. En este caso comprobamos que para el sistema con capacidad para transmitir 21dBm, la distancia límite entre estación base y equipo usuario pasa a ser de 15 metros en lugar de 4 para el límite superior en las pérdidas de propagación, y de 1,5 metros a 6 para el límite inferior. Respecto al resto de sistemas con potencias inferiores, 10dBm y 15dBm, la distancia máxima comienza a tomar valores aceptables de 6 y 10 metros respectivamente.

Escenario extendido. Interferencia microcelda

Finalmente realizamos la simulación del escenario extendido en el que calculamos la tasa de datos HSDPA cuando la distancia entre la antena que ofrece servicio a la microcelda y nuestro sistema toma distancias de 100, 250, 500 y 1000 metros.

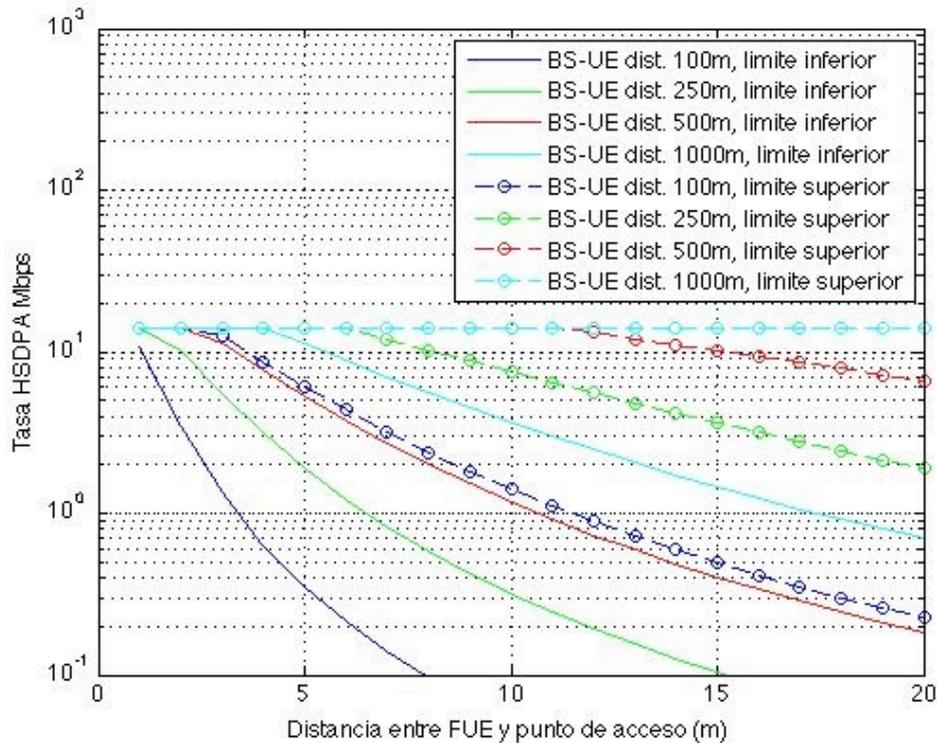


Figura 5.A.5. Tasa binaria HSDPA en función de la distancia entre FUE y FAP (caso microcelda)

En la Figura 5.A.5 podemos observar los resultados obtenidos. Tal y como era de esperar, se produce una mejora sustancial respecto a los valores obtenidos para el caso macrocelda. Cuando nos encontramos en el límite superior de las pérdidas, la tasa binaria ofrecida es realmente buena, para distancias menores de 10 metros entre usuario y punto de acceso es posible acceder al límite impuesto por los terminales utilizados si la antena microcelda se encuentra a más de 250 metros. Respecto a los casos más desfavorables, cuando la antena se encuentra a distancias de 100 y 250 metros, bastaría con una distancia de 5 metros entre terminal y FAP para conseguir tasas superiores a los 400 Kbps. Esta mejora en los servicios prestados cuando nos encontramos en un entorno urbano, convierten a las femtoceldas en un producto atractivo para ser ofrecido por las operadoras a sus usuarios de servicios móviles.

Conclusiones

A lo largo de esta sección hemos analizado el impacto del enlace descendente de una macro/micro celda en un sistema femtocelda cercano, llegando a las siguientes conclusiones:

Si la interferencia proviene de una macrocelda las prestaciones de nuestro sistema bajan considerablemente. En la Figura 5.A.2 comprobamos como a pesar de utilizar toda la potencia disponible por el punto de acceso, el terminal debe encontrarse a una distancia menor de 4 metros para detectar cobertura femtocelda. Por otro lado, respecto a la transferencia de datos los resultados obtenidos han sido bastante paupérrimos, especialmente si tenemos en cuenta la competencia con las redes WiFi. Es necesario que la antena macro Nodo B se encuentre a distancias superiores a medio kilómetro para acceder a capacidades en torno a 1 Mbps. Tal y como hemos especificado, estos resultados tan desfavorables se deben a que hemos representado un escenario muy pesimista, donde la media de la potencia interferente es de -48 dBm. Sin embargo, según la referencia [24], la probabilidad de que la señal recibida de la red macrocelda sea superior a este valor, es del 0.01%, de modo que en una situación real el rendimiento de la femtocelda mejoraría ligeramente.

En la segunda parte del escenario descrito, hemos supuesto que el origen de la interferencia es una antena microcelda transmitiendo valores de potencia 20 dB menos que en el caso anterior. Este hecho se traduce en un aumento de la cobertura femtocelda detectada por el usuario, de modo que cuando el punto de acceso transmite con 21 dBm de potencia la cobertura se encuentra en torno a 15 metros, es decir, cubre una superficie de 700 m². Si la potencia de transmisión es de 10 y 15 dBm, esta distancia se reduce a 6 y 9 metros respectivamente, valores aceptables para una aplicación doméstica a pesar de que la cobertura de todo un domicilio se encontraría condicionada a la localización del punto de acceso. Por ejemplo, para una vivienda de 100 m², un radio de 6 metros se traduce en un área de 113 m², de modo que solo podríamos cubrir toda la superficie cuando el punto de acceso se encuentra en el centro del domicilio, en el caso de que se sitúe en una esquina únicamente ofrecería servicio a un cuarto de la superficie de la vivienda.

Respecto al servicio de datos HSDPA, la capacidad percibida por el usuario ha experimentado una mejora sustancial. Cuando utilizamos el límite superior de pérdidas entre microcelda y terminal, y éste se encuentra a una distancia menor de 8 de su punto de acceso, podremos acceder a la máxima tasa ofrecida por el sistema. En el peor de los casos, el usuario debe situarse a más de 4 metros del punto FAP para reducir su capacidad a 1 Mbps. Por lo tanto, a pesar de encontrarnos en una escenario de interferencias muy desfavorable, las tecnología femtocelda puede ofrecer tasas binarias capaces de cubrir los servicios demandados actualmente.

Finalmente podemos concluir que la existencia de una antena macrocelda afecta considerablemente al rendimiento de los terminales femtocelda. Sin embargo, cuando nos encontramos en escenarios urbanos y la interferencia proviene de antenas menos potentes los servicios ofertados mejoran de manera notable. Una posible solución para eliminar el efecto nocivo de las interferencias, sería desviar la frecuencia del punto de acceso hacia un canal adyacente de modo que no comparta espectro con la antena macro Nodo B. Esta situación será desarrollada en el escenario G de este capítulo.

5.3. Escenario B. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el enlace ascendente del receptor femtocelda.

Descripción y objetivos

Un punto de acceso femtocelda se encuentra situado en el centro de una vivienda donde se recibe una cobertura macrocelda muy débil. Existen dos terminales dentro de la femtozona, el primero se sitúa muy cercano al punto de acceso y tiene restringido el uso de los servicios femtocelda, de modo que decide conectarse a la macro cobertura, mientras que el segundo de ellos se conecta a la femtocelda desde el límite de la cobertura ofrecida por ésta.

El usuario MUE decide realizar una llamada utilizando toda la potencia de la que dispone a fin de conectar con la macrocelda, de modo que la interferencia originada en este terminal y recibida en el punto de acceso FAP es máxima.

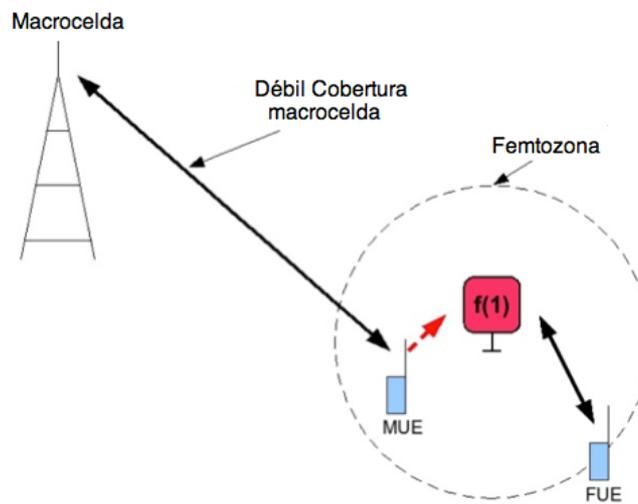


Figura 5.B.1. Escenario B

Los pasos a seguir para analizar este escenario de interferencias serán los siguientes:

Comenzaremos realizando un estudio de los servicios vocales que pueden ofrecerse en el contexto descrito. LLevaremos a cabo una simulación en la que calcularemos la separación mínima que debe existir entre MUE y femtocelda para conseguir la calidad de canal (E_b/N_0) necesaria para poder realizar una llamada de voz en función de la potencia transmitida por el terminal del usuario FUE. Además dibujaremos varias curvas cambiando la distancia entre FUE y femtocelda. Por último definiremos una serie de “zonas muertas”, dentro de las cuales la potencia del punto de acceso hace inviable la conexión entre macrocelda y usuario MUE.

El siguiente paso será analizar los servicios HSUPA que la tecnología femtocelda puede ofrecer en el escenario descrito. Simularemos la calidad del canal y la tasa binaria obtenida en el receptor FAP en función de la distancia entre MUE y femtocelda para dos casos concretos, en los que la distancia entre FUE y punto de acceso es de 5 y 15 metros.

Análisis de los servicios de voz

Comenzaremos estableciendo los parámetros que caracterizan una llamada de voz en nuestro sistema femtocelda:

	Valor	Unidades	Comentarios
Tasa binaria de una llamada de voz	12,2	Kbps	R
Chip Rate	3,84	Mbps	W
Ganancia de procesamiento	24,98	dB	$PG = 10 \log\left(\frac{W}{R}\right)$
Relación Eb/No necesaria para una llamada de voz	8,3	dB	Eb/No
Frecuencia enlace ascendente	1920	MHz	fc

Tabla 5.B.1. Suposiciones realizadas en el escenario B

El enlace entre equipo usuario MUE y receptor femtocelda viene definido por los parámetros mostrados en la Tabla 5.B.2

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia de transmisión del terminal MUE	21	dBm	P_{tx_mue}
Ganancia del terminal	0	dB	G_{ue}
Pérdidas por conectores	3	dB	L_{ue}
Potencia isotrópica efectiva transmitida	18	dBm	$EIRP_{mue} = P_{tx_mue} + G_{ue} - L_{ue}$
Distancia entre MUE y femtocelda	5,10,15	m	d_{mue}
Pérdidas de propagación	61,2	5m	PL_{mue}
	69,7	10m	
	74,3	15m	
Ganancia del punto de acceso FAP	0	dB	G_f
Pérdidas por alimentadores y conectores en FAP	1	dB	L_f
Potencia recibida en el punto de acceso FAP originadas en el terminal conectado a los servicios macrocelda MUE	-44,2	5m	$P_{rx_mue} = EIRP_{mue} - PL_{mue} + G_f - L_f$
	-52,6	10m	
	-57,6	15m	

Tabla 5.B.2. Balance de enlace entre MUE y receptor femtocelda

La potencia transmitida por FUE necesaria para cumplir las especificaciones de una llamada de voz viene definida en la Tabla 5.B.3. El procedimiento ha sido el siguiente: una vez conocida la ganancia de procesamiento, la potencia de ruido de nuestro sistema y la potencia transmitida por el terminal macrocelda, podremos calcular el valor de la potencia transmitida en FUE despejando en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{fue} = \frac{PG_{fue}P_{rx,fue}}{P_{rx,mue} + PN}$$

	Valor		Unidades	Comentarios
Distancia entre FUE y femtocelda	15		m	d_{fue}
Pérdidas de propagación	74,59		dB	PL_{fue}
Eb/No necesario para una llamada de voz	8,3		dB	$(Eb/No)_{fue}$
Ganancia de procesamiento	24,98		dB	PG_{fue}
Potencia de ruido	-103		dBm	PN
Potencia necesaria que debe ser recibida en la femtocelda para cumplir con los parámetros de una llamada de voz	-60,9	5m	dBm	$P_{rx,fue}$
	-69,4	10m		
	-74,3	15m		
Potencia transmitida por el terminal femtocelda	17,7	5m	dBm	$P_{tx,fue} = P_{rx,fue} - G_{ue} + L_{ue} + PL_{fue} - G_f + L_f$
	9,25	10m		
	4,32	15m		

Tabla 5.B.3. Potencia transmitida necesaria por la femtocelda para mantener una llamada de voz

Una vez definidos todos los parámetros, en la Figura 5.B.3 dibujamos las curvas que establecen la mínima separación entre MUE y femtocelda en función de la potencia transmitida por el usuario FUE. Destacar el papel de las zonas muertas creadas por el enlace descendente de la femtocelda, dentro de las cuales el terminal que hace uso de la macrocelda no podrá establecer conexión a pesar de encontrarse en un área en la que teóricamente dispone de este tipo de cobertura. Asumiendo un valor de RSSI constante de -65 dBm, en la referencia [R4-070969] se definen una serie de zonas muertas en función de la potencia transmitida por la femtocelda. Por lo tanto, conocidas las pérdidas máximas que pueden existir para encontrarse fuera de estas zonas podremos calcular, utilizando el modelo de propagación interiores ITU-P1238, la distancia a partir de la cual la MUE no tiene cobertura de la red macrocelda debido a la cercanía con el punto de acceso femtocelda. En la Tabla 5.B.2 podemos ver la distancia a partir de la cual nos encontraremos en una zona muerta para cada tipo de femtocelda.

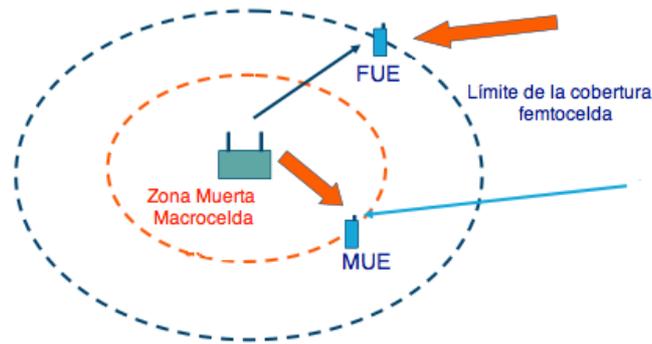


Figura 5.B.2. Representación de una "zona muerta"

Potencia Femtocelda	Limite zona muerta para un enlace descendente cocanal	Distancia entre femtocelda y MUE (ITU P.1238)
10 dBm	60 dB	5.9 m
15 dBm	65 dB	9 m
20 dBm	70 dB	13.5 m

Tabla 5.B.4. Radio de la "zona muerta" para cada clase de punto de acceso

En estas situaciones, la solución pasa por redirigir al usuario macrocelda hacia otra frecuencia UMTS o rechazar la petición de realizar la llamada. En cualquiera de estos dos casos el nivel de interferencia desciende de manera notable, y las exigencias en el enlace ascendente se reducen considerablemente. Esta situación, cuando el usuario MUE interfiere a la femtocelda desde un canal adyacente, será estudiado en el escenario H.

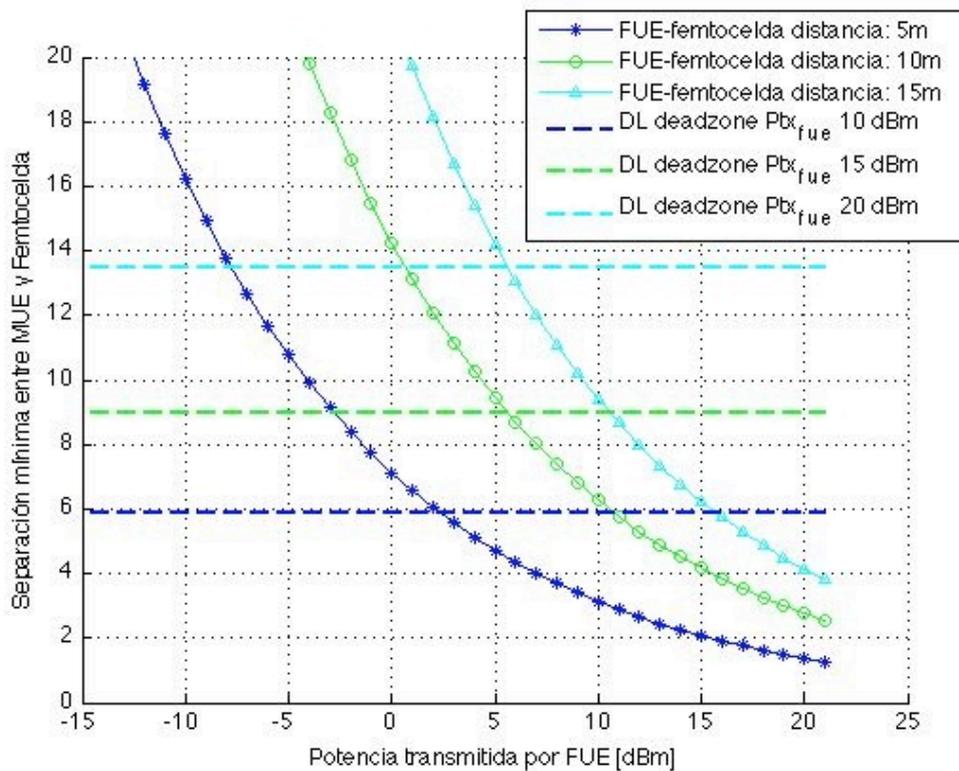


Figura 5.B.3. Separación mínima entre MUE y FAP en función de la potencia transmitida

Para el peor caso, en el que FUE se encuentra más alejada del punto acceso, podemos observar como la distancia mínima hacia el usuario macrocelda debe ser de aproximadamente 4 metros a pesar de transmitir utilizando toda la potencia disponible en el terminal (21 dBm). En el caso de que el terminal se encuentre más cercano esta distancia se reduce a 2.5 y 1.5 metros para 10 y 15 dBm respectivamente.

Nos llama la atención la capacidad de “anular” a los usuarios macrocelda cuando la potencia transmitida por el punto de acceso de de 21 dBm. A pesar de que el terminal MUE se encuentre muy cercano, seremos capaces de realizar la llamada desde nuestro terminal femtocelda, ya que la señal interferente será eliminada al redirigir o rechazar la llamada desde el sistema macrocelda. Por lo tanto, la primera posibilidad para evitar las consecuencias nocivas de las interferencias generadas en el escenario descrito, es aumentar la potencia transmitida por la femtocelda siempre y cuando sea posible.

Análisis de los servicios HSUPA

Durante el siguiente apartado vamos a analizar los servicios HSUPA que puede ofrecer un sistema femtocelda en el escenario descrito. Los principales parámetros de simulación se encuentran detallados en la Tabla 5.B.5.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia transmitida por la FUE	21	dBm	$P_{tx,fue}$
Ganancia del terminal	0	dBi	G_{ue}
Pérdidas por conectores	3	dB	L_{ue}
Potencia isotrópica efectiva transmitida	18	dBm	$EIRP_{mue} = P_{txmue} + G_{ue} - L_{ue}$
Distancia entre FUE y femtocelda	5	m	d_{fue}
Potencia transmitida por la MUE	21	dBm	$P_{tx,mue}$
Separación entre MUE y femtocelda	10	m	d_{mue}
Potencia recibida en el punto de acceso proveniente de la MUE	-49,44	dBm	$P_{rx,mue}$
Potencia de ruido	-103	dBm	No
E-DPDCH E_c/N_0	-2,57	dB	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{fue} = \frac{P_{rx,fue}}{P_{rx,mue} + N_0}$

Tabla 5.B.5. Parámetros de simulación para servicios HSUPA

Nos centraremos en determinar la calidad del canal de datos E-DPDCH para los casos en los que el usuario FUE se encuentra a 5 y 15 metros del punto de acceso. Además supondremos que el nivel de interferencia será máximo, de modo que el usuario macrocelda realizará la llamada utilizando toda la potencia de la que dispone.

Respecto a la tasa binaria, ésta vendrá dada en función de la relación E_c/N_0 en el canal E-DPDCH. En este sentido, hemos utilizado como referencia el documento [28] del 3GPP donde recomienda utilizar el modelo de canal (FRC) 3# para un peatón tipo A . Dicho canal viene definido por los siguientes parámetros:

Tamaño TTI	Tamaño Bloque de Transporte	Códigos	Tasa de Código	Bit Rate máximo	Categoría UE
2 ms	8064 bits	2SF4+2SF 2	0,71	4056 Kbps	6

Tabla 5.B.6. Parámetros canal (FRC 3#)

Donde:

- E_c/N_0 de 2,4 dB. Genera una tasa binaria superior al 30% del máximo, 1200 Kbps
- E_c/N_0 de 9,4 dB. Genera una tasa binaria superior al 70% del máximo, 2800 Kbps

Finalmente mostramos los resultados de la simulación para distancias de 5 y 15 metros, se encuentran en la Figura 5.B.4:

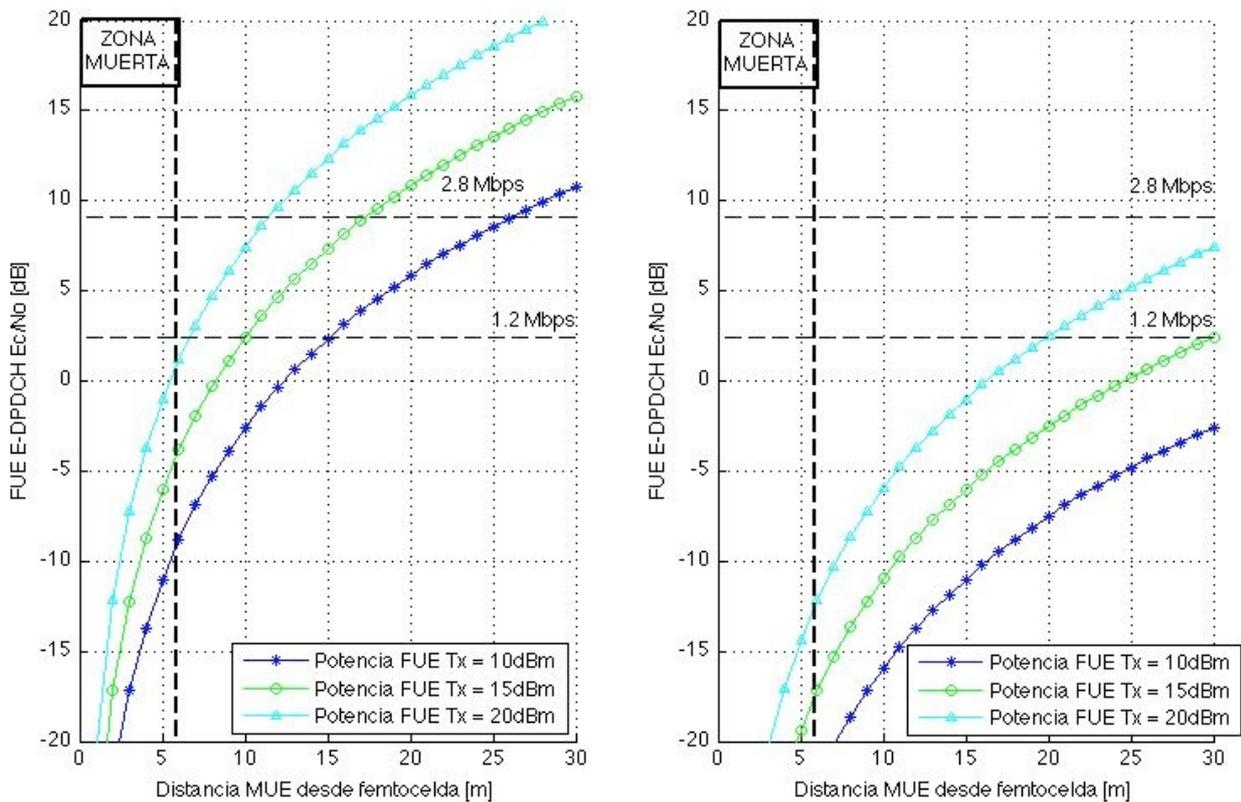


Figura 5.B.4. E_c/N_0 en función de la distancia entre MUE y FAP

Destacar que a la hora de dibujar las curvas no hemos tenido en cuenta las zonas muertas, dentro de las cuales no existirá interferencia proveniente de la MUE. Hemos especificado la zona muerta de 5.9 metros mediante una recta centrada en dicha distancia.

Otro aspecto a tener en cuenta, especialmente cuando la distancia entre FUE y femtocelda es de 15 metros, consiste en que el modelo de propagación ITU P.1238 puede sobreestimar las pérdidas producidas, ya que tiene en cuenta muchos elementos interiores

como muebles, paredes... por ejemplo si el escenario fuese una vivienda con jardín, dentro de este espacio podríamos utilizar un modelo que proporcionase menores pérdidas de propagación.

Cuando la distancia entre punto de acceso y terminal FAP es de 5 metros podemos comprobar como a pesar de existir un usuario macrocelda muy cercano, la relación E_c/N_0 del receptor femtocelda es superior a 2 dB si el terminal FUE utiliza toda su potencia disponible, lo que se traduce en una capacidad de 1 Mbps aproximadamente. En el caso de que el equipo MUE se encuentre fuera de la vivienda del usuario, lo que correspondería a una distancia superior de 20 metros, la relación E_c/N_0 es de 15 dB si el terminal utilizada los 21 dBm disponibles y de 10 dB si decide reducir la potencia de transmisión a 15 dBm.

En la segunda gráfica realizamos el mismo estudio para el caso en el que el terminal FUE se encuentre cerca del límite de la cobertura ofrecida por el punto de acceso. Ahora la relación E_c/N_0 cae hasta los -10 dBm cuando el usuario MUE realiza la llamada muy cerca del receptor FAP. Dichos valores no serían capaces de ofrecer la calidad de canal suficiente para ofrecer un servicio de datos competitivo actualmente. Sería necesario que el terminal interferente se encontrase a una distancia superior a 20 metros para conseguir un valor de E_c/N_0 alrededor de 2 dB.

Finalmente en la Figura 5.B.5, conocida la relación E_c/N_0 y el tipo de canal considerado, podemos transformar las curvas anteriores en valores de capacidad en función de la distancia entre MUE y femtocelda.

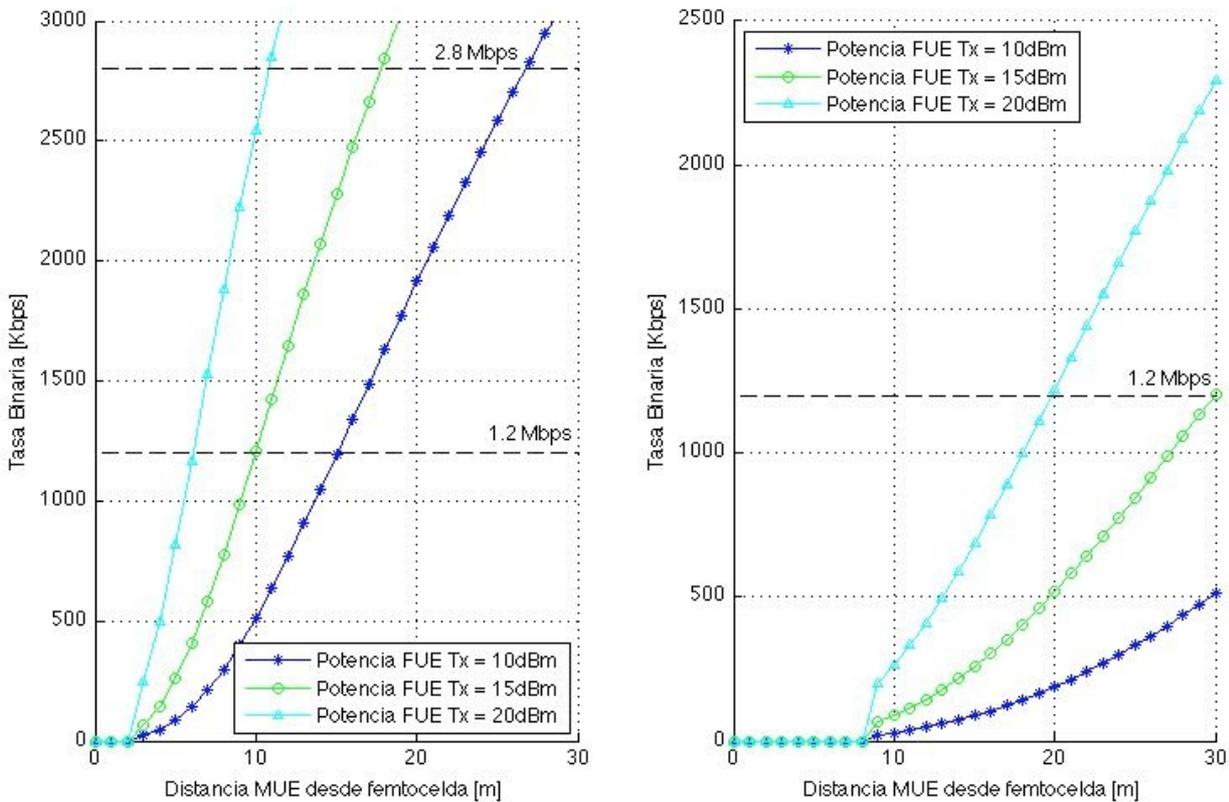


Figura 5.B.5. Capacidad del enlace en función de la distancia entre MUE y FAP

Tal y como era de esperar, cuando el terminal FUE se encuentra cerca de su punto de acceso los resultados, en términos de Kbps, son bastante buenos a pesar de la existencia de un usuario macrocelda interfiriendo en el mismo canal que el receptor FAP. En estos casos podríamos asegurar tasas binaria superiores a 1.2 Mbps, ya que en los casos en los que el terminal MUE se encuentre a una distancia menor de 6 metros entrará dentro de una “zona muerta” y será desviado a otro canal UMTS. Sin embargo en la segunda gráfica comprobamos como si el usuario femtocelda se sitúa cerca del límite de su cobertura las prestaciones del sistema bajan considerablemente. Ahora sería necesario que la interferencia provenga de un usuario macrocelda que probablemente se encuentre fuera de la vivienda en la que se encuentra instalado el punto de acceso para acceder a tasas similares

Conclusiones

Tras realizar un estudio de los efectos nocivos de la interferencia cocanal generada por el enlace ascendente de un terminal macrocelda en el receptor del sistema femtocelda, llegamos a las siguientes conclusiones.

En cuanto a los servicios de voz 12.2 Kbps AMR ha quedado demostrada la capacidad de poder realizar un llamada incluso en situaciones en las que el terminal MUE se encuentra muy cercano a nuestro punto de acceso femtocelda. Respecto a esta cuestión cabe destacar la capacidad de anular a los usuarios MUE por parte de la femtocelda. Cuando el punto FAP detecta altos niveles de interferencia originados por un terminal desconocido, bastaría con que aumentase su potencia de transmisión para generar lo que hemos llamado una “zona muerta” cocanal, de modo que dicho terminal ser encontraría obligado a redirigir su llamada hacia otra frecuencia. La aplicación de este tipo de gestión del espectro UMTS con el fin de eliminar interferencias entre usuarios macro y femtocelda obliga a la existencia de un protocolo de redirección de frecuencias. De modo que el punto de acceso FAP sea consciente de las antenas macro Nodo B que existen a su alrededor a fin de poder redirigir correctamente a los terminales MUE.

En cuanto al rendimiento del enlace HSUPA podemos llegar a la conclusión de que las interferencias generadas por el usuario MUE únicamente afectan a los usuarios femtocelda cuando éstos se sitúan en el límite de su cobertura. Si el terminal FUE si encuentra a una distancia menor de 5 metros podremos garantizar capacidades superiores a 1 Mbps. Sin embargo, cuando los usuarios femtocelda se encuentran lejos de su punto de acceso, la capacidad del enlace HSUPA es muchos más sensible a la interferencia de un usuario macrocelda, siendo necesario que éste se encuentre a más de 20 metros de distancia (fuera de la vivienda) para ofrecer tasas superiores de 1.2 Mbps. Por lo tanto, los usuarios macrocelda que se encuentren fuera de los domicilios donde haya instalado un punto FAP no suponen una amenaza para los servicios prestados por la femtocelda.

Desde el punto de vista de los usuarios macrocelda, las femtoceldas son una nueva fuente de interferencia. Como ya hemos especificado, cuando los terminales MUE detecten cobertura femtocelda deben realizar un traspaso hacia otra frecuencia. Sin embargo habrá situaciones en las que no será posible redirigir la llamada, en estos casos la calidad del enlace será muy pobre, llegando incluso a perder dicha llamada.

En el caso de los usuarios femtocelda, el efecto de las interferencias generadas por los terminales MUE se traduce muchas veces en un impedimento para llegar a la calidad de servicio esperada. En las simulaciones realizadas, siempre hemos supuesto que los usuarios macrocelda realizaban la llamada utilizando toda su potencia disponible. A pesar de esta condición tan pesimista, cuando la distancia entre FUE y FAP es de 5 metros (79 m²) conseguíamos buena cobertura femtocelda y valores competitivos en la capacidad del enlace HSUPA. Destacar estudios de los operadores móviles donde muestran que los terminales únicamente utilizan toda su potencia el 1% de su tiempo de actividad, y el 95% de las veces esta potencia es menor de 10 dBm. Por lo que es de esperar que el rendimiento de una femtocelda sea superior en una implementación real.

5.4. Escenario C. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el receptor del equipo usuario de la macrocelda

Descripción y objetivos

Durante el análisis del escenario C, un usuario macrocelda se sitúa en el límite de su cobertura, además dicho terminal se encuentra en la misma habitación que un punto de acceso femtocelda FAP. En este caso, el origen de la interferencia es el enlace descendente de la femtocelda y la víctima el usuario macrocelda.

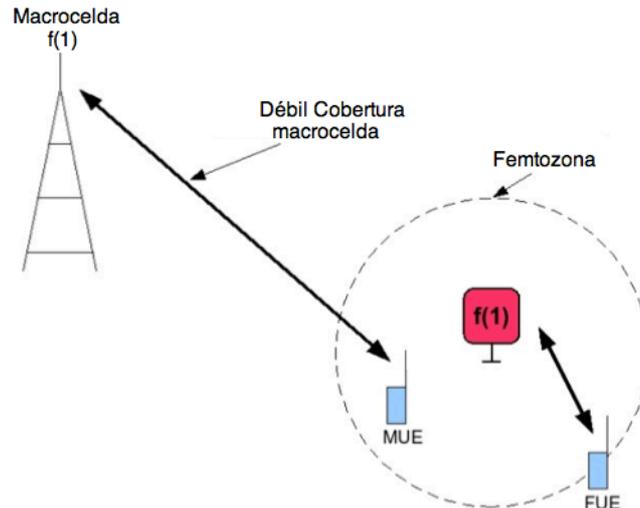


Figura 5.C.1. Escenario C

Analizaremos el efecto de las interferencias generadas por los puntos de acceso FAP en los servicios ofrecidos mediante dos vías:

- Análisis de potencia cuando la femtocelda se encuentra totalmente cargada de información
- Simulación de Monte Carlo para estimar el impacto en la capacidad del sistema cuando una capa de femtoceldas se encuentra interfiriendo a la capa macrocelda en la misma frecuencia (cocanal)

Análisis de los servicios de voz

En la Tabla 4.3 asumimos que el límite de la cobertura macrocelda vendrá definido por una potencia de -103 dBm en el canal de pilotos P-CPICH, además supondremos que es necesario una relación E_c/N_0 de al menos -20 dB en dicho canal para detectar la femtocelda y poder mantener una llamada de voz.

Comenzaremos calculando la potencia recibida en el canal P-CPICH del terminal macrocelda, utilizaremos la recomendación ITU P.1238 para modelar las pérdidas de propagación en escenarios interiores, suponiendo que usuario y femtocelda se encuentran en la misma planta de un edificio dentro de un entorno puramente residencial.

Tal y como supusimos en el escenario A, será necesario un margen de 20 dB para poder detectar y realizar una llamada desde la red macrocelda. Por lo tanto, el valor máximo de potencia procedente de la femtocelda que llega al terminal no podrá superar una potencia

de -83 dBm, por debajo de este valor se encontrará en lo que hemos denominado “zona muerta” donde no existirá cobertura macrocelda.

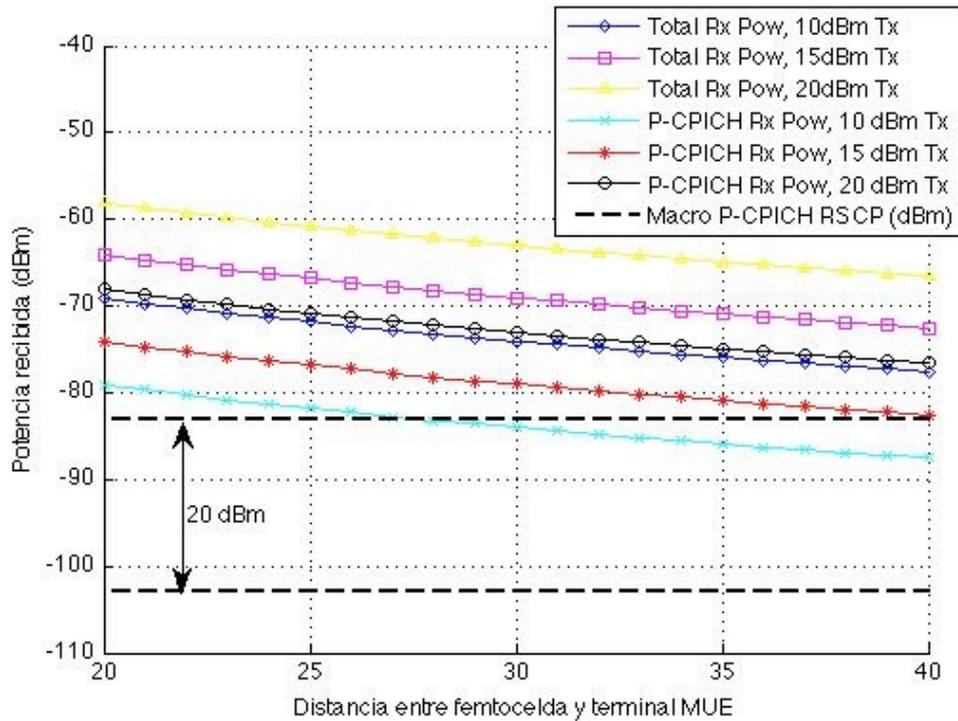


Figura 5.C.2. Potencia recibida en MUE desde la femtocelda

En la Figura 5.C.2 observamos la evolución de la potencia femtocelda (interferencia) recibida en MUE en función de la distancia entre estos dos elementos. Podemos observar como la “zona muerta” se extiende hasta los 25 metros incluso utilizando control adaptativo de potencia CPICH para la femtocelda de clase más baja (10 dBm). Es decir, para poder realizar una llamada desde un terminal macrocelda con garantías suficientes de calidad de voz será necesario encontrarnos a más de 25 metros de cualquier punto de acceso femtocelda.

Otra forma de visualizar el compromiso entre potencia transmitida por el punto de acceso y distancia que debe existir entre éste y terminal macrocelda, consiste en visualizar la máxima potencia que puede transmitir en función de la distancia entre femtocelda y MUE. En la Figura 5.C.3 comprobamos que para que pueda existir una distancia de separación razonable, en torno a cinco metros, la potencia transmitida por el punto de acceso femtocelda no puede superar los -10 dBm. Por lo tanto existirá cierta relación entre cercanía de los terminales FUE y radio de la zona muerta generada. Cuando los usuarios femtocelda se encuentren muy cercanos a su punto de acceso, éste utilizará un nivel de potencia bajo, de modo que los terminales MUE que se encuentren cerca del punto podrán realizar llamadas con un margen de 20 dB frente al límite de la cobertura macrocelda. Sin embargo, si el punto de acceso se ve obligado a prestar servicio a un terminal situado en el borde de su cobertura, la potencia con la que se ve obligado a transmitir será elevada, creando una zona de más de 20 metros de radio a su alrededor, en la que los terminales MUE no podrán realizar llamadas con el margen establecido anteriormente.

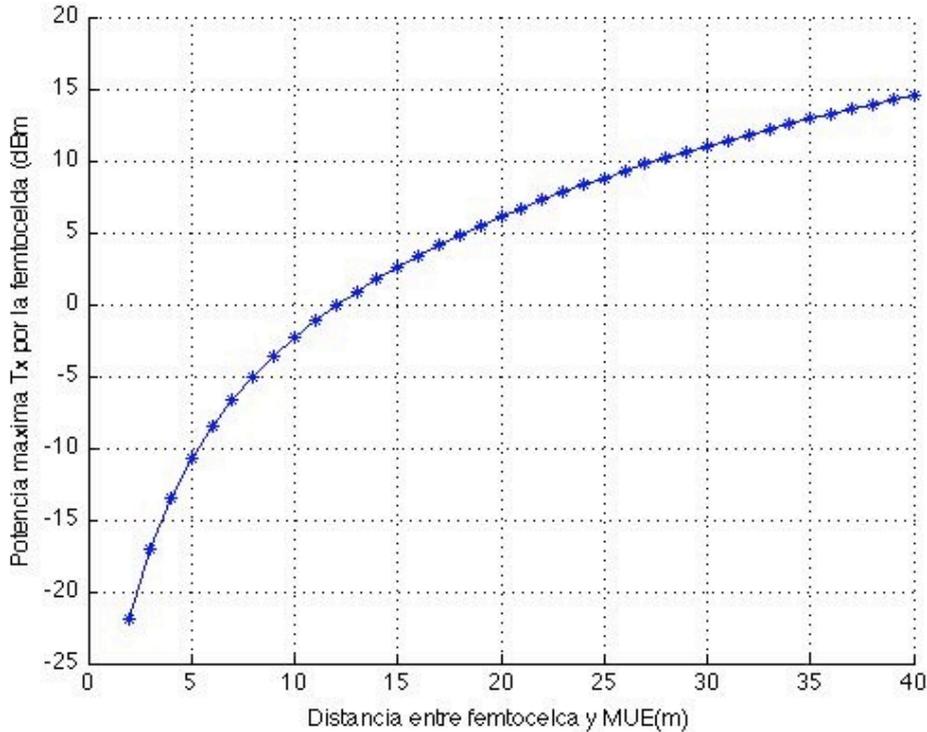


Figura 5.C.3. Máxima potencia de transmisión en FAP en función de la distancia al terminal MUE

La solución más sencilla para poder resolver el problema de las “zonas muertas” creadas alrededor de un punto FAP, sería reducir la potencia transmitida en el canal P-CPICH de la femtocelda. Sin embargo supondría reducir la cobertura de los usuarios FUE para favorecer a los usuarios que hacen uso de los servicios macrocelda. Lo que no resulta favorable desde el punto de vista del operador, ya que el primer cliente ha contratado un servicio por el que paga mensualmente mientras que el otro no. La siguiente posibilidad pasa por realizar un traspaso de la llamada realizada por el terminal MUE hacia un canal adyacente, esta situación será estudiada en el escenario I de este mismo capítulo. Finalmente existirán otras técnicas de mitigación de interferencias más complejas. En el capítulo 6 proponemos un esquema basado en coordinación entre estaciones base, en el que los puntos FAP dejan de competir entre ellos para perseguir un objetivo común, de modo que la potencia transmitida por cada uno de ellos se reducirá considerablemente.

Escenario extendido. Análisis de la capacidad HSPA

Durante la capítulo 3 hemos especificado el aumento del ancho de banda ofrecido en servicios HSPA es como una de las principales ventajas de la introducción de la tecnología femtocelda, ya que alrededor del punto de acceso existen un número pequeño de usuarios a consta de utilizar coberturas muy pequeñas. Propiedad que contrasta con los objetivos de los sistemas macrocelda, que buscan ofrecer una cobertura muy grande para dar servicios a un número elevado de usuarios, por lo que el ancho banda es compartido con otros usuarios, dando lugar a un descenso en la tasa binaria ofrecida a cada usuario

A fin de comprender de manera más concisa el impacto de la aparición de los sistemas femtocelda en los servicios ofrecidos a cada terminal MUE, realizaremos una simulación de Montecarlo generando un gran número de estos terminales dentro de un pequeño pueblo donde una de cada tres viviendas contienen un punto de acceso femtocelda. Una vez realizado todo el proceso mostraremos la función acumulativa de las tasas binarias disponibles en los usuarios macrocelda para cada clase de femtocelda (6, 13 y 21 dBm).

Los parámetros de simulación serán los siguientes:

	Valor	Unidades
Distancia entre macroceldas	900	m
Altura de la antena	25	m
Altura del terminal	1	m
Potencia de transmisión	20	Watts
Ganancia de la antena	18	dBi
Tamaño del pueblo	500	m
Tamaño de cada casa	8.3X17.5	m ²
Perdidas por penetración en pared	12	dB

Tabla 5.C.1. Parámetros de simulación

En la Figura 5.C.4. mostramos la situación de la capa macrocelda, donde entre las coordenadas (0:500, -250:250) existe una urbanización en la que operan diversos sistemas femtocelda. Los punto rojos corresponden a la posición de una antena macrocelda, y cada uno de los puntos azules simboliza una estación base femtocelda.

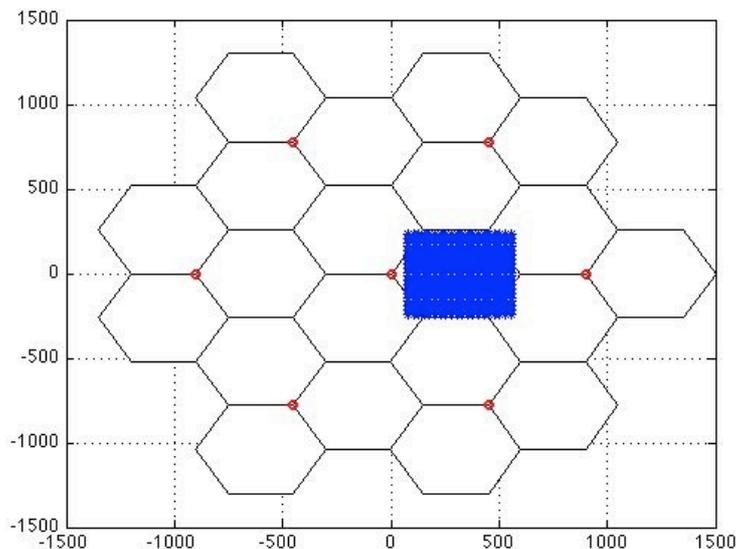


Figura 5.C.4. Disposición de las femtoceldas en el entorno macrocelda

En la siguiente figura observamos la situación de la urbanización con mayor detalle. Respecto a los usuarios macrocelda, comprobamos como conforme se mueven en la urbanización casi siempre será la misma celda la encargada de ofrecer servicios HSPA.

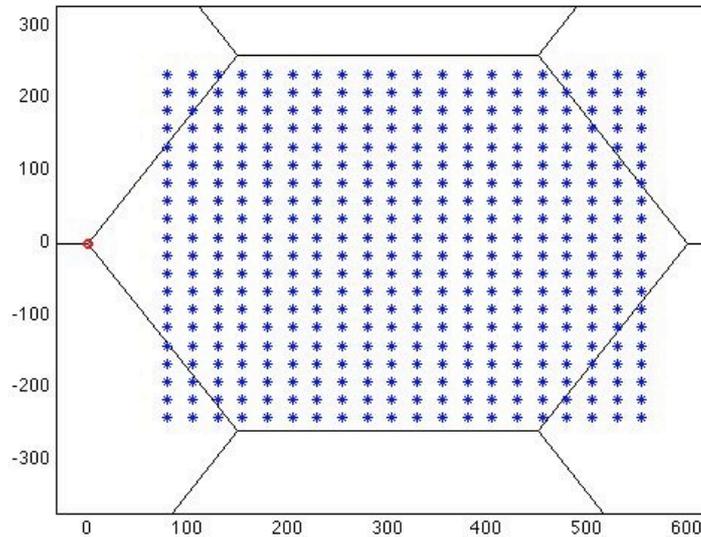


Figura 5.C.5. Detalle de la disposición de las femtoceldas dentro de la urbanización

Llegados a este punto, solo queda generar los usuarios MUE y determinar la influencia de las 400 femtoceldas que se encuentran distribuidas a lo largo del escenario. Comenzamos suponiendo el peor de los casos, en el que todas los puntos de acceso operan en la misma frecuencia que la utilizada en la celda en la que se mueven los terminales MUE. Sin embargo ésta suposición resulta especialmente negativa, y la posibilidad de que existan un número tan elevado de femtoceldas cercanas realizando interferencia cocanal resulta muy poco probable. Por lo tanto el siguiente paso fue realizar la misma simulación suponiendo que del total de puntos de acceso de la urbanización, solo se encontraban en el mismo canal de frecuencia el 50 y 20 por ciento de ellos. Finalmente añadimos el caso en el que no existe ningún tipo de interferencia femtocelda con el objetivo de poder comparar esta situación con los casos anteriores.

En la Figura 5.C.6 mostramos la función acumulativa de las simulaciones realizadas cuando todas las femtoceldas interfieren en el enlace descendente de la antena macro Nodo B. Lo primero que nos llama la atención es la diferencia que existe entre las curvas en función de la potencia transmitida por las femtoceldas. Si los puntos de acceso transmiten a plena potencia, serán capaces de anular la tasa binaria del usuario MUE, únicamente el 15% de los usuarios podrá acceder a velocidades superiores a 500 Kbps. En los casos en los que la potencia transmitida es menor la capacidad del canal HSPA mejora considerablemente, en torno al 40% y el 70% de los terminales MUE superarán capacidades de 500 Kbps cuando la femtocelda transmite con 13 y 6 dBm respectivamente. Finalmente, respecto al máximo de la capacidad ofrecida por la antena macro Nodo B, solo el 10% de los usuarios podrá realizar transferencia de datos con una tasa binaria de 3.6 Mbps, porcentaje que sube hasta el 23% cuando la potencia es de 6 dBm. Sin embargo cuando el usuario MUE se encuentra fuera de un entorno nocivo, el porcentaje de los usuarios que disfrutaran del máximo caudal ofrecido es del 35% y puede asegurarse una velocidad superior a 1 Mbps.

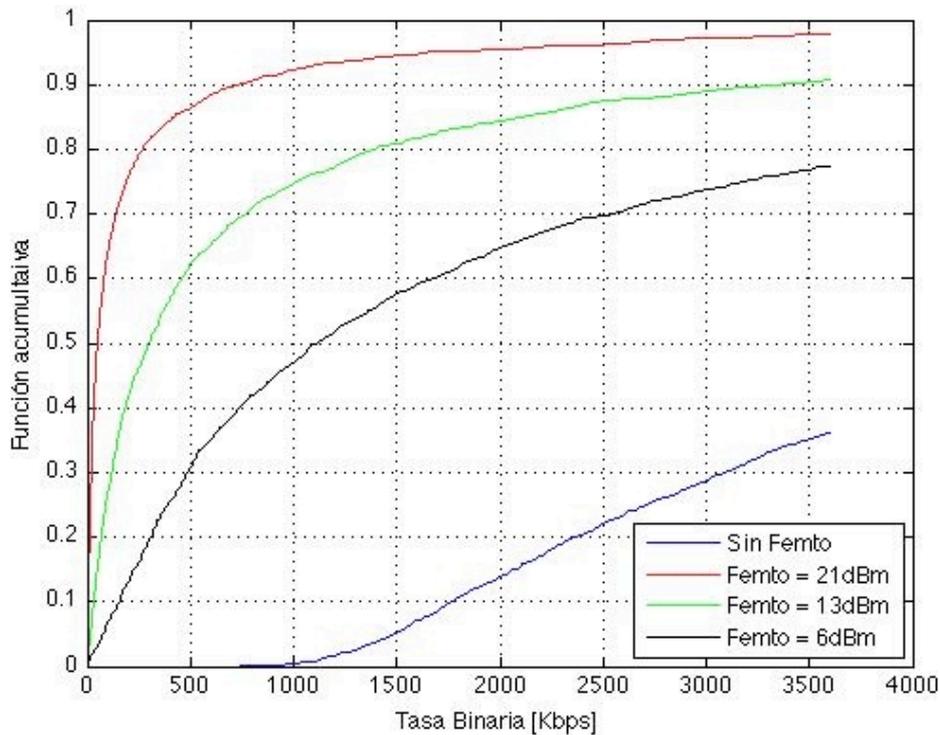


Figura 5.C.6. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (100% FAPs activos)

El siguiente paso fue asumir que únicamente la mitad de los puntos de accesos generaban interferencia cocanal. Realizamos una simulación idéntica a la anterior, con la salvedad de que ahora decidimos si la femtocelda se encuentra en la misma frecuencia que la celda de la antena macro Nodo B utilizando la función aleatoria de Matlab. En la Figura 5.C.7 comprobamos como han mejorado las prestaciones ofrecidas al terminal MUE respecto a la situación anterior. Cuando nos encontramos en el peor de los casos, el 30% de los usuarios pueden acceder a una capacidad superior a 500 Kbps, es decir, hemos duplicado en número de usuarios superan dicha velocidad. Si la potencia de transmisión en cada punto FAP es menor de 13 dBm podremos asegurar una tasa binaria de 1 Mbps en la mitad de las posibilidades. Respecto a la menor potencia femtocelda simulada, destacar la mejoría que existiría al utilizar únicamente dos frecuencias repartidas entre los 400 puntos de acceso, en este caso podríamos asegurar tasas binarias superiores a 500 Kbps, y en torno a la mitad de los usuarios podría utilizar capacidades superiores a 2 Mbps. Sin embargo los resultados siguen lejos de acercarse a los obtenidos cuando no existe interferencia originada por los puntos FAP, de modo que procedemos a suponer que el porcentaje de femtoceldas interferentes se reduce al 20% .

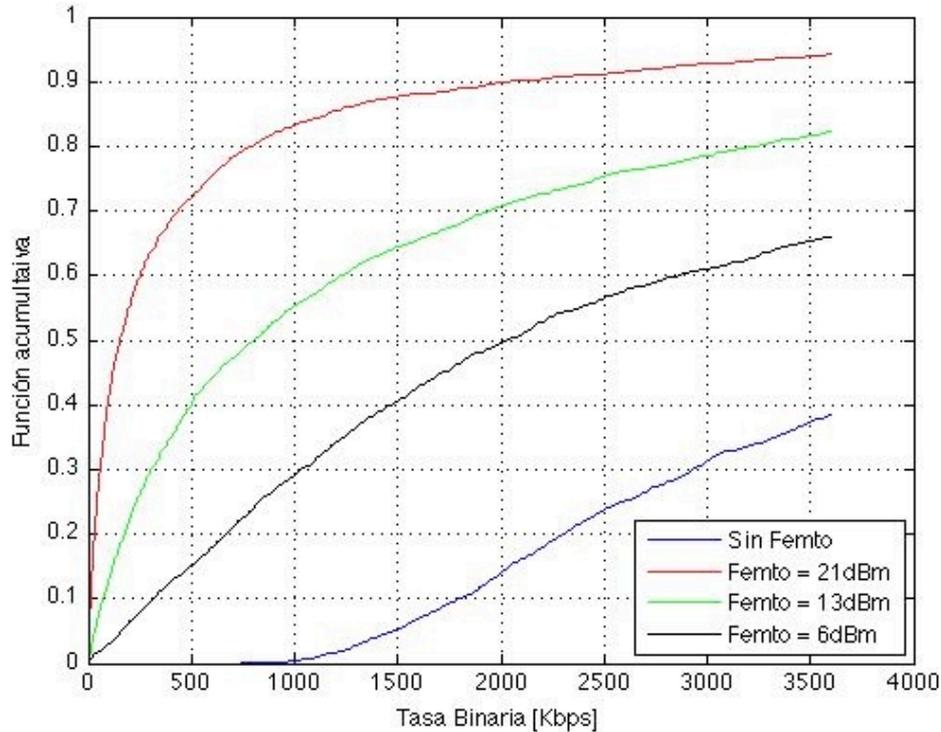


Figura 5.C.7. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (50% FAPs activos)

Finalmente, en la Figura 5.C.8, ofrecemos los resultados obtenidos cuando solo el 20% de las femtoceldas colaboran para generar interferencia cocanal en el terminal MUE. Tal y como era de esperar los resultados han mejorado considerablemente, especialmente cuando cada punto de acceso transmite una potencia de 6 dBm, en este caso la curva obtenida resulta casi paralela al caso en el que no existe interferencia femtocelda con una diferencia de 15 percentiles. En los dos casos restantes observamos una bajada en las curvas de 20 puntos respecto a los resultados conseguidos en las Figura 5.C.7. Si la potencia de cada punto FAP es de 21 dBm, en torno al 50% de los usuarios macrocelda que se encuentren dentro de la urbanización especificada podrán alcanzar velocidades superiores a 500 Kbps. Finalmente tan solo tendremos que llegar al percentil veinteavo para acceder a dicha tasa binaria si la potencia de transmisión es de 13 dBm.

Otro aspecto a destacar es el número de usuarios que podrán obtener la máxima velocidad ofrecida por el sistema, fijada en 3.6 Mbps. A pesar de que la cantidad de femtoceldas interferentes únicamente es del 20% de un total de 400, en el peor de los casos solo el 15% de los terminales puede acceder a la capacidad máxima, porcentaje que llega al 48% si la potencia de transmisión es de 6 dBm, mientras que en el caso en el que no existe interferencia originada en los puntos de acceso, es alcanzada por el 68% de los usuarios.

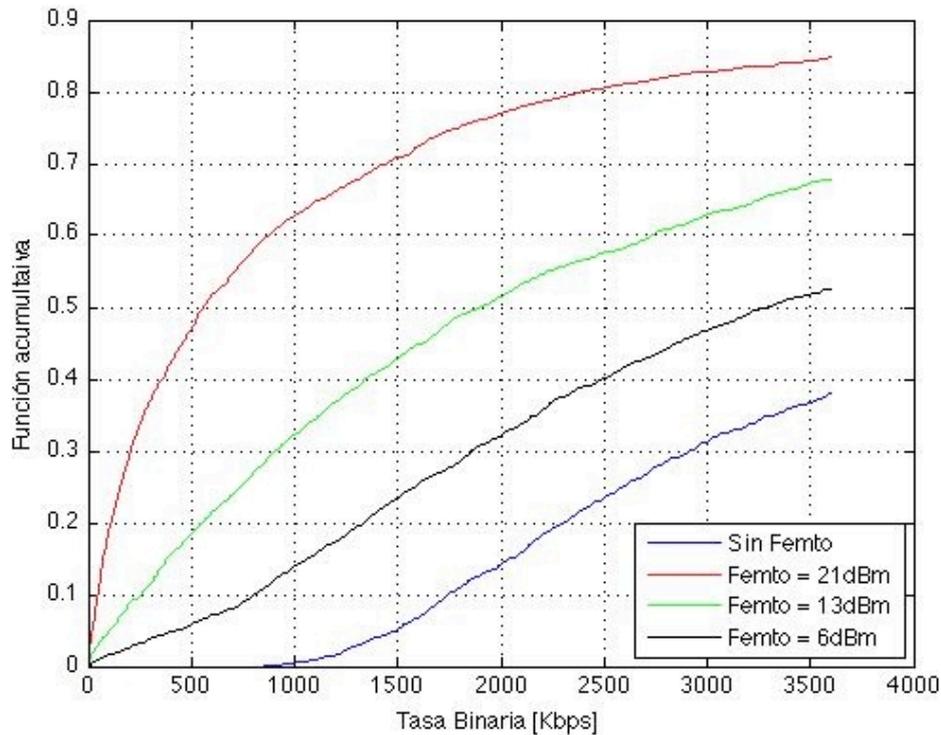


Figura 5.C.8. CDF tasa binaria disponible en terminal MUE (20% FAPs activos)

Conclusiones

Tras realizar un análisis de las consecuencias de la aparición de una capa femtocelda en las prestaciones de los usuarios macrocelda podemos llegar a las siguientes conclusiones.

La primera de ellas es la existencia de un compromiso entre la cobertura que un punto de acceso puede ofrecer a sus usuarios y la “zona muerta” que se genera alrededor de éste. En la Figura 5.C.2 hemos comprobado como, asumiendo un margen de 20 dB, un terminal MUE se debe situar a más de 30 metros del punto FAP para poder realizar una llamada con garantías. Por lo tanto, será necesario aplicar mecanismos de control de potencia a fin de reducir el radio de las zonas en las que, a pesar de encontrarse dentro de la cobertura ofrecida por la antena macro Nodo B, no se posible prestar servicio macrocelda debido a las interferencias generadas por los sistemas femtocelda cercanos. La primera técnica propuesta ha sido utilizar control de potencia adaptativa en el canal CPICH, tras observar los resultados obtenidos podemos concluir que su utilización es necesaria para reducir todo lo posible el radio de dichas “zonas muertas”.

En las siguientes simulaciones hemos estudiado la capacidad ofrecida en servicios HSPA cuando el terminal MUE se encuentra dentro de un entorno caracterizado por una gran cantidad de femtoceldas activas. Si los puntos de acceso transmiten con potencias pequeñas en torno a 6 dBm, los resultados obtenidos son relativamente buenos, en el peor de los casos, en el que todas las femtoceldas colaboran en la interferencia recibida por el usuario macrocelda, podremos asegurar velocidades superiores a 1 Mbps. Sin embargo, los puntos de acceso femtocelda pueden transmitir valores más elevados de potencia, en estos casos las prestaciones descienden drásticamente cuando todos los sistemas comparten la

misma banda espectral. En las Figuras 5.C.7 y 5.C.8 comprobamos la mejoría en la tasa binaria al utilizar varias frecuencias en los puntos de acceso de nuestra urbanización. La diversidad de frecuencias resulta necesaria para poder acercarnos al caso en el que no existe interferencia cocanal entre los puntos de acceso y la red macrocelda. En este sentido resultaría muy provechoso realizar una separación entre red macro y femtocelda respecto a los canales utilizados, de modo que podremos asegurar que no exista interferencia cocanal entre ambos sistemas.

5.5. Escenario D. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el receptor de la antena microcelda (Nodo B)

Descripción y objetivos

Al igual que en el escenario B analizamos el efecto de las interferencias generadas por un terminal MUE en el receptor femtocelda, en la siguiente sección estudiaremos el caso contrario. Realizaremos un estudio de la interferencia creada por los terminales femtocelda FUE en el receptor de la antena encargada de dar cobertura microcelda. Respecto a las suposiciones, utilizaremos las mismas que en escenario anteriores. La antena Nodo B se encuentra a una distancia de 30 metros del terminal FUE, el cual sitúa en el límite de la cobertura femtocelda, dentro de una vivienda junto a la venta a fin de maximizar la interferencia, por lo que será necesario que transmita con el máximo de potencia disponible. El modo de cuantificar el efecto de dichas interferencias será mediante el cálculo de la degradación en la sensibilidad del receptor de la antena micro Nodo B, denominado aumento de ruido.

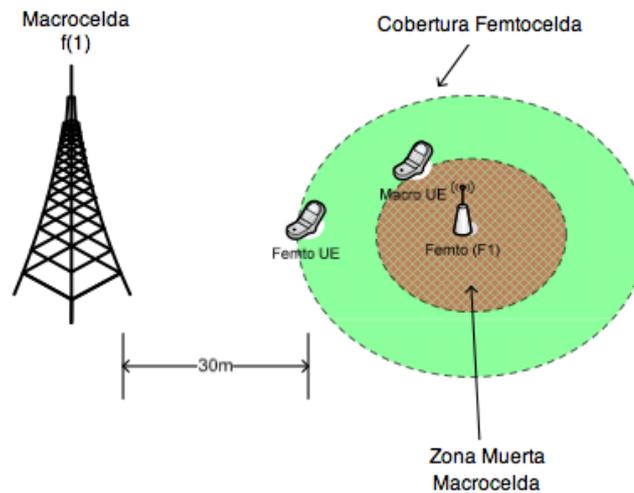


Figura 5.D.1. Escenario D

El análisis del escenario se divide en las siguientes secciones:

- Comenzaremos realizando un análisis del efecto de la interferencia en términos de servicio de voz. Destacar que durante este apartado tomaremos como referencia estudios ya realizados del impacto de los terminales microcelda en la antena receptora en lugar de terminales FUE.
- El segundo paso consiste en extender el análisis del escenario descrito hacia servicios HSUPA. Para ello calcularemos el nivel de ruido generado por un terminal FUE cuando hace uso de servicios de alta velocidad de datos.

Análisis del servicio de voz

Para determinar el aumento de ruido en la antena encargada de dar servicio microcelda debido a los equipos usuarios femtocelda, realizaremos un sencillo estudio basado en los balances de enlace de los trayectos ascendentes y descendentes de los elementos de nuestro sistema.

Comenzamos especificando las razones por las que un terminal FUE se ve obligado a transmitir a plena potencia, a pesar de que las pérdidas de propagación sean muy pequeñas debido al tamaño de la cobertura ofrecida por un punto de acceso femtocelda. Estas pueden ser:

- Interferencias cocanal generadas por un terminal MUE
- Interferencias en un canal adyacente creadas por un terminal MUE
- Interferencias generadas por un terminal femtocelda muy cercano, por ejemplo un ordenador portátil utilizando servicios 3G en la misma mesa que el terminal.

Además tendremos que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En torno al punto de acceso se generará una zona muerta en la que los usuarios microcelda no podrán realizar llamadas.
- La posibilidad de que un terminal MUE transmita al máximo de su potencia disponible es muy baja debido a la escasa distancia con la antena microcelda (30m). La única razón por la que lo podría hacer es debido a la cercanía a una zona muerta.

A la hora de medir el incremento de ruido que se produce en la antena nodo B, será necesario conocer el ruido inicial que existe en dicho elemento. Según la referencia [38] la sensibilidad de la antena micro Nodo B encargada de prestar servicios de llamada de voz con una tasa de 12,2 Kbps es de -111 dBm. Luego para nuestro caso concreto:

	Valor	Unidades	Comentarios
Sensibilidad de la antena	-111	dBm	Sens [38]
Tasa binaria de servicio de voz	12,2	Kbps	R
Chip rate	3,84	MHz	W
Ganancia de procesamiento	24,98	dB	$10 \log(W/R)$
Eb/No necesaria	8,3	dB	Eb/No
Ruido de base	-94,32	dB	$n_{f_{ant}} = Sens + PG - \frac{E_b}{N_o}$

Tabla 5.D.1. Ruido de base de la antena microcelda

Por último será necesario especificar el radio de la zona muerta co-canal para un terminal MUE, asumiendo las recomendaciones de la referencia [44] vendrá definida por unas pérdidas entre MUE y punto de acceso de 60 dB, cuando la potencia transmitida por el FAP es de 10 dBm.

Para analizar la interacción entre todos los elementos del escenario descrito en la Figura 5.D.1 realizaremos los siguientes pasos:

1. Cálculo de la potencia transmitida por el equipo usuario microcelda cuando se encuentra en el filo de su zona muerta y a una distancia de la antena micro Nodo B de 30 metros
2. Cálculo de la cobertura ofrecida por el punto de acceso femtocelda teniendo en cuenta la interferencia generada por el enlace descendente de la microcelda
3. Determinar la potencia transmitida por el equipo FUE cuando se encuentra en el filo de su cobertura, teniendo en cuenta la interferencia generada por el terminal MUE
4. Finalmente, una vez conocemos la potencia interferente emitida por el usuario femtocelda, calculamos el incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a los terminales FUE situados dentro de la micro cobertura.

1. Potencia transmitida por el terminal MUE

El enlace entre equipo usuario MUE y la antena micro Nodo B viene dado por los siguientes parámetros:

	Valor	Unidades	Comentarios
Ganancia de la antena	2	dBi	G_{ant}
Perdidas en alimentador y conectores	1	dB	L_f
Valor de potencia mínimo requerido en la antena micro Nodo B	-112	dBm	$P_{min} = Sens - G_{ant} + L_f$
Pérdidas al atravesar una pared externa	20	dB	L_w
Pérdidas entre Nodo B y MUE	89,1	dB	$L_{tot} = Loss_{ITU-P1411}(30m) + L_w$
Potencia transmitida por el terminal MUE	-22,9	dBm	$P_{mue} = P_{min} + L_{tot}$

Tabla 5.D.2. Potencia de transmisión del usuario MUE en el borde de la zona muerta femtocelda

2. Cobertura ofrecida por la femtocelda

LLegados a este punto debemos obtener la cobertura generada por la femtocelda. Teniendo en cuenta la cercanía con la antena micro Nodo B, únicamente consideraremos las interferencias creadas por dicha antena como factor limitador de la cobertura.

Destacar que durante este apartado hemos realizado las siguientes suposiciones:

- Será necesario un valor mínimo de -16 dB en la relación señal a interferencia para poder realizar una llamada de voz bajo la condición $I_{own}/I_{other} = -1dB$.
- Factor de ortogonalidad de $\alpha = 0.9$
- Potencia máxima de la femtocelda en el enlace descendente de 10 dBm
- Potencia total transmitida por la antena micro Nodo B de 38 dBm
- El factor de utilización de ambas antenas es del 50 %

- Se asignará un 10% de la potencia disponible en el punto de acceso femtocelda para llamadas de voz
- Utilizando el modelo de propagación ITU P.1411 las pérdidas entre micro Nodo B y femtocelda son de 74.06 dB

El rendimiento en el canal DPCH “Downlink Didicated Physical Channel” de la femtocelda operando en cocanal con una antena micro Nodo B, puede ser modelado como la relación de la potencia recibida desde el punto de acceso FAP entre la potencia interferente originada en la microcelda y en la propia femtocelda (factor de ortogonalidad distinto de 1). Es decir:

$$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_{DCH_{voz}} = \frac{P_{femto-llamada} / L_{femto}}{\left(0.5(1-\alpha)P_{femto-total} / L_{femto}\right) + P_{micro-interferencia}} \quad \text{Ecuación 5.D.1}$$

Además, según la referencia [41], la relación Ec/Io en en canal DCH para llamadas de voz 12k2 puede mostrarse como:

$$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_{DCH_{voice}} = \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH} \times \left[(1-\alpha) + \frac{1}{I_{propia} / I_{otras}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 5.D.2}$$

Y el valor de la interferencia cocanal generada por la microcelda vendrá dado por:

$$P_{micro-interferencia} = 10^{(P_{micro-total_dB} - 3 - L_{micro-femto_dB})/10} \quad \text{Ecuación 5.D.3}$$

Finalmente, sustituyendo el valor de la interferencia microcelda y especificando la relación Ec/Io en el canal DCH en función de la del canal DPCH llegaríamos a la siguiente ecuación:

$$L_{femto_dB} = -10 \log \left[\frac{P_{micro-interferencia} \times \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}}{P_{femto-llamada} - \left(0.5(1-\alpha)P_{femto-total} \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}\right)} \right] \quad \text{Ecuación 5.D.4}$$

Donde:

L_{femto}	pérdidas entre FAP y FUE
$L_{micro-femto}$	pérdidas entre FUE y micro Nodo B
$P_{micro-interferencia}$	potencia interferente microcelda recibida en terminal FUE
$P_{femto-llamada}$	potencia asignada por la femtocelda a una llamada de voz
$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_{DCH_{voice}}$	relación señal a interferencia necesaria en canal DCH
$\left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}$	relación señal a interferencia mínima en canal DPCH
$P_{femto-total}$	potencia total transmitida por la femtocelda
α	Factor de ortogonalidad del enlace descendente femtocelda
I_{propia} / I_{otras}	relación interferencia entre la propia celda y el rest

Tras realizar todo el proceso, determinamos que las pérdidas que delimitan la cobertura femtocelda con de:

$$L_{femto} = 56,4 \text{ dB}$$

3. Potencia transmitida por el terminal FUE

El siguiente paso es calcular la potencia transmitida por el terminal FUE:

	Valor	Unidades	Comentarios
Frecuencia	2100	MHz	Enlace Descendente
Pérdidas entre MUE y femtocelda	60	dB	L_{dz} (zona muerta)
Ancho de banda	3,84	MHz	B
Densidad de ruido termal	-174	dBm/Hz	tnd
Figura de ruido del receptor	8	dB	NF
Densidad de ruido en el receptor	-166	dBm/Hz	$rnd = tnd + NF$
Potencia de ruido en el receptor	-100,16	dBm	$rnp = rnd + 10 \log(B)$
Carga de la antena	50	%	L
Incremento de ruido debido a la carga	3,01	dB	$IM = -10 \log\left(1 - \frac{L}{100}\right)$
Potencia transmitida en terminal MUE	-22,94	dBm	P_{mue}
Interferencia microcelda en el receptor femtocelda	-82,94	dBm	$P_{mue} _{rec} = P_{mue} - L_{dz}$
Ruido de Base en en receptor femtocelda	-82,8	dBm	$trnp = 10 \log\left(\sum_{lineal} P_{fue} _{rec} + rnp + IM\right)$
Tasa Binaria del terminal	12,2	Kbps	R
Chip Rate	3,84	MHz	W
Ganancia de procesamiento	24,98	dB	$10 \log\left(\frac{W}{R}\right)$
Relación Eb/No mínima	8,3	dB	$\frac{E_b}{N_0}$ [canal DCH]
Señal mínima para detectar un terminal femtocelda	-99,57	dBm	$P_{f \min} = trnp - PG - \frac{Eb}{No}$
Pérdidas entre FUE y punto de acceso	56,35	dB	DL_{cov}
Potencia transmitida en terminal FUE	-43,22	dBm	$\min(21, \max(P_{f \min} + DL_{cov}, -50))$

Tabla 5.D.3. Potencia interferente transmitida por el usuario femtocelda

4. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B

Finalmente calculamos el incremento de ruido generado en la antena micro Nodo B por un único equipo usuario femtocelda y extenderemos el resultado para el caso en el que existan varios terminales FUE.

	Valor	Unidades	Comentarios
Ganancia de la antena Nodo B	2	dBi	G_{ant}
Pérdidas en alimentadores y conectores	1	dB	L_f
Ruido de base en la antena	-94,32	dBm	[Tabla 1]
Potencia transmitida en el terminal FUE	-46,48	dBm	P_{mue}
Ganancia de la antena terminal	0	dBi	$G_{m_{ant}}$
Potencia isotrópica transmitida por los terminales femtocelda	-46,48	dBm	$P_{fue_eirp} = P_{fue} + G_{m_{ant}}$
Pérdidas al atravesar una ventana	5	dB	L_w
Pérdidas totales entre FUE y Nodo B	74,06	dB	$L_{tot} = Loss_{ITU P1411}(30m) + L_w$
Interferencia del terminal FUE recibida en el conector de la antena microcelda	-116,28	dB	$P_{fue_red} = P_{fue_eirp} - L_{tot} + G_{ant} - L_f - ACS$
Valor por encima del ruido de base	-21,84	dB	R
Incremento de ruido	0,03	dB	$NR = 10 \log(1 + 10^{0.1R})$

Tabla 5.D.4. Incremento de ruido en la antena microcelda

Finalmente procedemos a extender el resultado obtenido al caso en el que existen varios usuarios en torno a la antena micro Nodo B. Para ello, únicamente tenemos que sumar las interferencias generadas por todos los terminales femtocelda que existan en el área cubierta por la antena micro Nodo B. Destacar que los resultados son ligeramente pesimistas, ya que si existen decenas de usuarios FUE, la probabilidad de que todos ellos se encuentren en el límite de su femto cobertura es muy pequeña. En la Figura 5.D.2 mostramos la variación del incremento de ruido en función del número de usuarios femtocelda interferentes.

Destacar la linealidad existente entre el número de usuarios e incremento de ruido. Cuando solamente encontramos un único terminal FUE dentro del área cubierta por la microcelda, el incremento de ruido es de 0.03 dB. Este nivel de degradación apenas será percibido en el receptor de la antena micro Nodo B. Necesitaríamos llegar hasta más de 30 usuarios para alcanzar incrementos de ruido superiores a 1 dB.

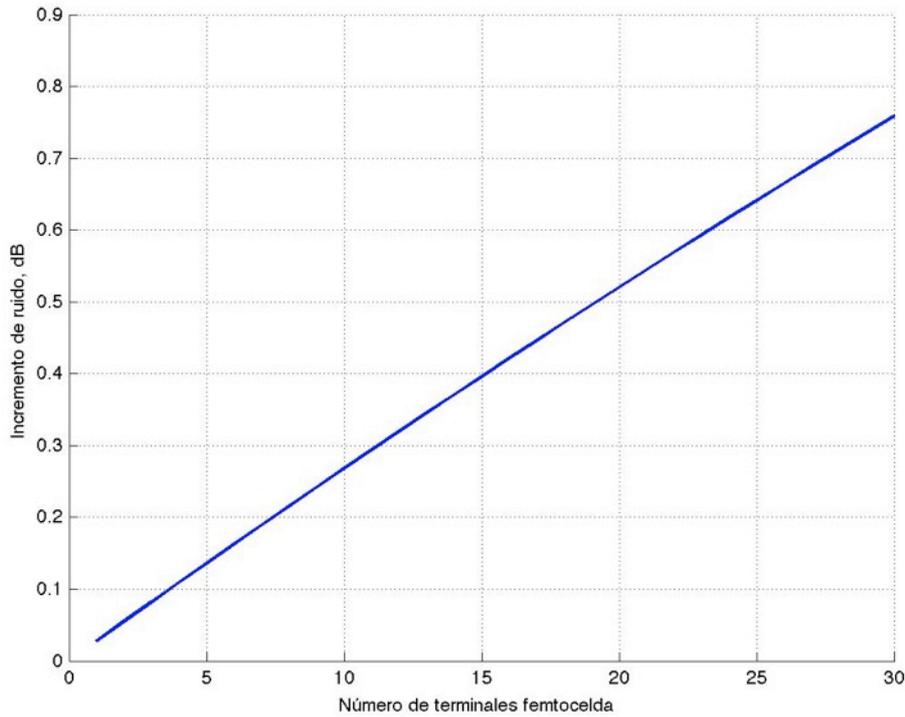


Figura 5.D.2. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a múltiples usuarios FUE

Análisis de los servicios HSUPA

Dentro de nuestro escenario en el que el equipo usuario femtocelda se encuentra en el límite de su cobertura y dentro de la ofrecida por una antena micro Nodo B, la degradación que ésta sufre, incremento de ruido, es mayor cuando el equipo FUE hace uso de servicios de alta velocidad HSUPA.

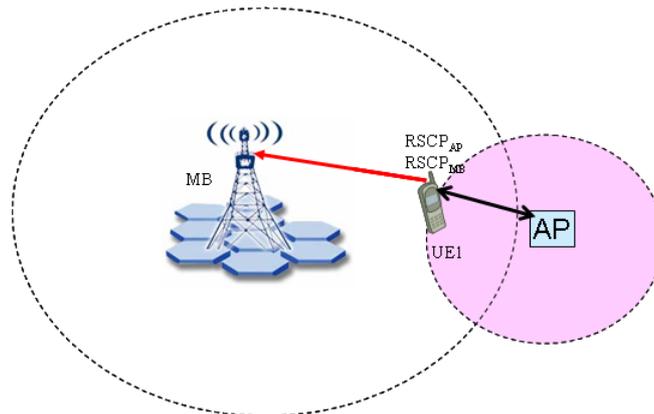


Figura 5.D.3. Escenario D. Servicios HSUPA

Para que un terminal FUE pueda establecer comunicación con un punto de acceso FAP, la relación señal a interferencia debe de ser como mínimo de -16 dB. Tal y como hemos supuesto durante este escenario los enlaces de la micro y la femtocelda se encontraran cargados al 50%. Por lo que teniendo en cuenta el dato de relación E_c/I_0 anterior, la diferencia entre potencia de códigos recibidos RSCP debe ser de $(RSCP_{MB} - RSCP_{AP}) = 8,4$ dB.

	Valor	Unidades	Comentarios
Relación E_c/I_0 mínima del enlace descendente	-16	dB	E_c/I_0
Carga del micro enlace descendente	50	%	NR_{MB_DL}
Carga del femto enlace descendente	50	%	NR_{AP_DL}
Diferencia en canal CPICH	8,4	dB	$\Delta RSCP$

Tabla 5.D.5. Parámetros de sistema. Servicios HSUPA

En la Tabla 5.D.6 mostramos todas las suposiciones realizadas y el procedimiento llevado a a cabo para determinar el incremento de ruido que se produce cuando un usuario femtocelda hace uso de servicios HSUPA. Comenzamos especificando una velocidad HSUPA de 1.5 Mbps, de modo que de acuerdo con la referencia [24], será necesario una relación portadora a ruido de E_c/N_0 de -1 dB. Si el usuario FUE se sitúa en el filo de la cobertura ofrecida por su punto de acceso y a una distancia aproximada de 900 metros de la antena micro Nodo B, el incremento de ruido de la antena micro Nodo B será de 1.3 dB. Destacar la diferencia que existe entre servicios de voz y de datos de alta velocidad, cuando un terminal femtocelda solamente realiza una llamada de voz dicho incremento de ruido es de solo 0.03 dB.

	Valor	Unidades	Comentarios
Diferencia en canal CPICH	8,4	dB	$\Delta RSCP$
Umbral de demodulación para servicios HSUPA	-1	dB	E_c/I_0
Carga del femto enlace ascendente	75	%	NR_{MB_DL}
Figura de ruido de la femtocelda	12	dB	NF_{AP}
Máxima potencia transmitida por la femtocelda	15	dBm	P_{CPICH_AP}
Máxima potencia transmitida por la microcelda	43	dBm	P_{CPICH_MB}
Interferencia	-110,6	dBm	I
Potencia de ruido	-108	dBm	N_0
Figura de ruido de la microcelda	2	dB	NF_{MB}
Ruido de base en micro Nodo B	-106	dBm	$N_0+N_{F_{MB}}$
Incremento de ruido en la antena micro Nodo B	13	dB	NR

Tabla 5.D.6. Incremento de ruido en la antena microcelda. Servicios HSUPA

Conclusiones

La consecuencia principal del escenario tratado, ha sido comprobar como la introducción de la tecnología femtocelda generará una degradación en las antenas micro Nodo B que deberá ser tomada en cuenta a la hora de implementar ambos sistemas. Si un gran número de terminales FUE utilizan toda su potencia disponible muy cerca de una antena microcelda, ésta verá reducida su cobertura debido a las interferencias generadas en su receptor por dichos terminales.

En cuanto a llamadas de voz, hemos demostrado que debido a la baja calidad de canal necesaria para poder realizar este tipo de servicio, los terminales femtocelda no deben utilizar niveles de potencia muy elevados. Este hecho se traduce en un pequeño incremento de ruido, 0.03 dB, cuando solo existe un usuario dentro de la cobertura microcelda. Sin embargo, pensemos en el área cubierta por este tipo de antenas, en un entorno urbano sería posible encontrar decenas de terminales FUE transmitiendo a plena potencia, de modo que no podríamos despreciar el incremento de ruido debido a este tipo de interferencia.

Durante el segundo apartado de este análisis hemos realizado un sencillo estudio del nivel de interferencia creado cuando el usuario utiliza servicios HSUPA. En estos casos el incremento de ruido es mucho mayor, en torno a 1.3 dB. A pesar de que la probabilidad de que las suposiciones realizadas, interferencia cocanal, cercanía a la antena micro Nodo B, terminales utilizando toda su potencia disponible... es muy pequeña, este nivel de degradación resulta inadmisibles conforme aumenta el número de usuarios interferentes. Por lo tanto será necesario un control estricto de estas situaciones a fin de evitar una reducción en las prestaciones ofrecidas a los usuarios microcelda.

Finalmente cabe destacar algunas recomendaciones para asegurar una convivencia positiva entre sistemas micro y femtocelda. La más sencilla de ellas pasa por limitar la potencia máxima que un terminal FUE puede transmitir. Sin embargo este tipo de medida solamente significa reducir el rendimiento de los sistemas femtocelda para favorecer a los usuarios MUE.

Teniendo en cuenta las posibilidades que nos ofrece la tecnología femtocelda, existen otras vías para poder mitigar la interferencia cocanal. La primera de ellas es realizar un análisis del entorno que la rodea, es decir, detectar el número de antenas micro Nodo B y la frecuencia de portadora que utilizan. Una vez conocida esta información, decidir el tipo de frecuencia utilizada entre sus usuarios. Otra posibilidad es realizar una operación de traspaso del terminal FUE cuando detecta una antena microcelda cercana, de este modo no solo mejoraría su propias prestaciones, sino también las ofrecidas a la red microcelda.

5.6. Escenario E. Enlace descendente de una femtocelda interfiere en el receptor de un femto punto de acceso vecino

Descripción y objetivos

Hasta ahora hemos estudiado la interacción entre las capas macro y femto celda. El objetivo de este nuevo escenario es determinar el efecto de las interferencias generadas entre sistemas femtocelda, para ello comenzamos suponiendo dos apartamentos próximos equipados con tecnología femtocelda. El usuario del punto de acceso FAP2 realiza una visita a su vecino FAP1 encontrándose en el filo de su propia femtozona, pero a una distancia menor de tres metros del punto de acceso 1. En un momento dado, el usuario UE1 realiza una llamada, de modo que su punto de acceso debe transmitir una potencia en torno a 10 dBm, en dicha situación la interferencia generada por FAP1 y recibida en UE2 es máxima. En la Figura 5.E.2 mostramos una representación del escenario tratado.

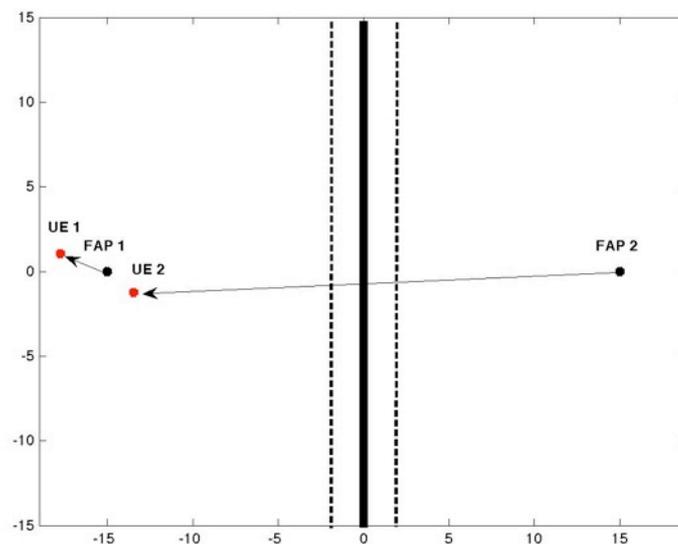


Figura 5.E.1. Escenario E

LLevaremos a cabo el análisis de dicho escenario mediante una simulación de Monte Carlo de la capacidad disponible por los usuarios femtocelda. Para ello supondremos una pequeña urbanización compuesta por 15 puntos FAP con sus respectivos usuarios. Comenzamos considerando que todas las femtoceldas contribuyen a crear interferencia cocanal, sin embargo, esta suposición resulta muy pesimista, de modo que simularemos distintos casos en los que solo un porcentaje de los puntos de acceso trabajan en la misma frecuencia. Finalmente tendremos que tener en cuenta la posible interacción con una antena microcelda cercana.

Análisis. Simulación de Montecarlo

En la Figura 5.E.2 encontramos el diseño de la pequeña urbanización compuesta por tres filas (calles) en las que existen un total de cinco puntos de acceso en cada una. Destacar que a la hora de realizar la simulación nos centraremos en el efecto que las interferencias tiene en el punto central de la urbanización FAP 8, localizado en las coordenadas (0,0).

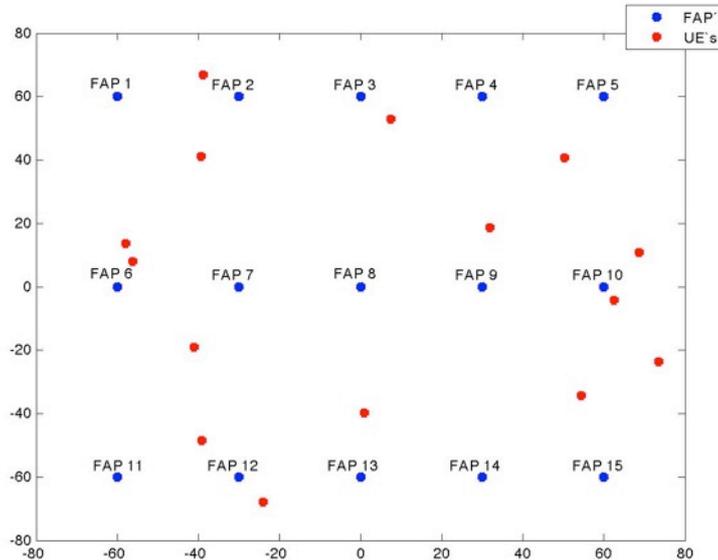


Figura 5.E.2. Esquema de simulación

Respecto a los parámetros supuestos, en la Tabla 5.E.1 observamos los principales valores femtocelda considerados. Para determinar las pérdidas por propagación, necesitaremos un modelo que se ajuste a entornos interiores de baja densidad, por lo tanto, utilizaremos la recomendación ITU P.1238 caracterizada a escenarios residenciales.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia femtocelda	10	dBm	$P_{tx\ fap}$
Potencia femtocelda en canal CPICH	0	dBm	$P_{tx\ fap_cpich}$
Porcentaje dedicado a servicios HSDPA	80	%	
Ganancia de las antenas FAP y FUE	0	dBi	G_{fap}, G_{ue}
Pérdidas en alimentadores y cableado en FUE	3	dB	L_{fue}
Pérdidas de penetración en la pared	12	dB	L_{wall}

Tabla 5.E.1. Parámetros de simulación

Finalmente podemos mostrar los resultados de la simulación en la Figura 5.E.3. En el caso en el que todas las femtoceldas producen interferencias cocanal los resultados son realmente malos, necesitaríamos llegar hasta el percentil noventa para alcanzar tasas superiores a 500 Kbps. En los siguientes casos la capacidad ofrecida mejora sustancialmente, si la interferencia es producida por la mitad de los puntos FAP, en torno al 30% de los usuarios simulados podrán acceder a dicha velocidad. Finalmente utilizando únicamente 4 frecuencias en el esquema de reutilización de nuestra urbanización, podríamos asegurar tasas por encima de 1 Mbps para la mitad de los usuarios, y a partir del percentil setentavo los usuarios superarían velocidades de 2.5 Mbps.

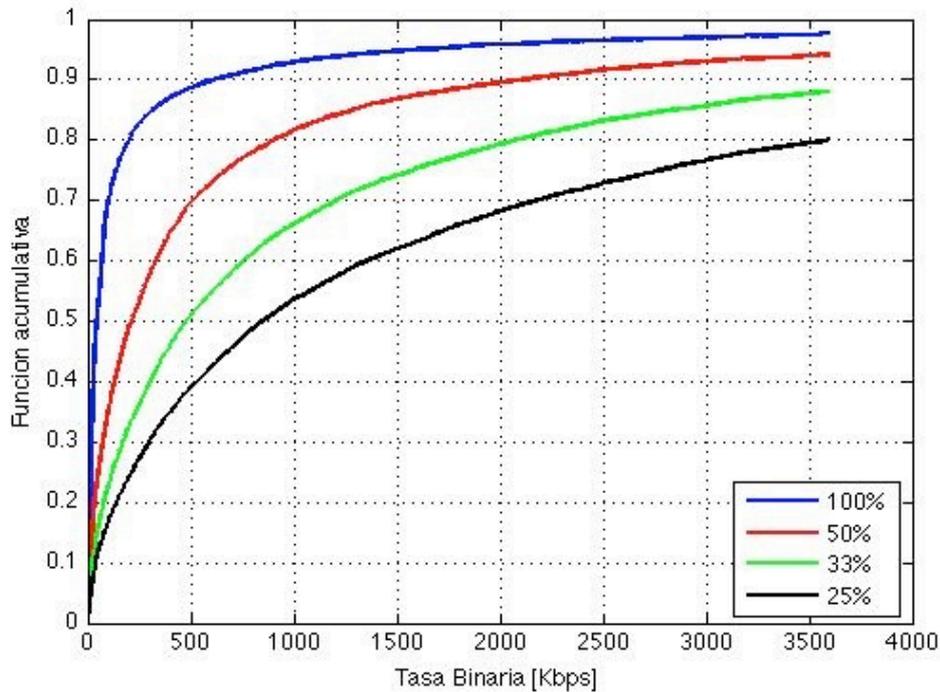


Figura 5.E.3: CDF de la tasa binaria disponible

Destacar que las suposiciones realizadas son bastante pesimistas, la probabilidad de que todos los puntos de acceso utilicen una potencia de transmisión superior a 10 dBm es muy pequeña. Por lo tanto, es de esperar tasas ligeramente mayores en una implementación real.

El siguiente paso de nuestro escenario será repetir la simulación descrita cuando la urbanización se encuentra inmersa en un entorno microcelda, de modo que tendremos que tener en cuenta tanto las interferencias generadas por las propias femtoceldas como las originadas por la antena micro Nodo B.

Análisis. Simulación de Montecarlo, entorno microcelda

Durante la siguiente sección realizaremos una simulación de Monte Carlo de la capacidad ofrecida a los usuarios femtocelda de nuestro escenario cuando existe una antena microcelda cercana. Encontramos un esquema del entorno simulado en la Figura 5.E.4, la antena micro Nodo B se encuentra en la posición (-500, -500), de modo que las zonas rojas corresponden a los puntos donde la interferencia microcelda es máxima, y los azules donde es mínima.

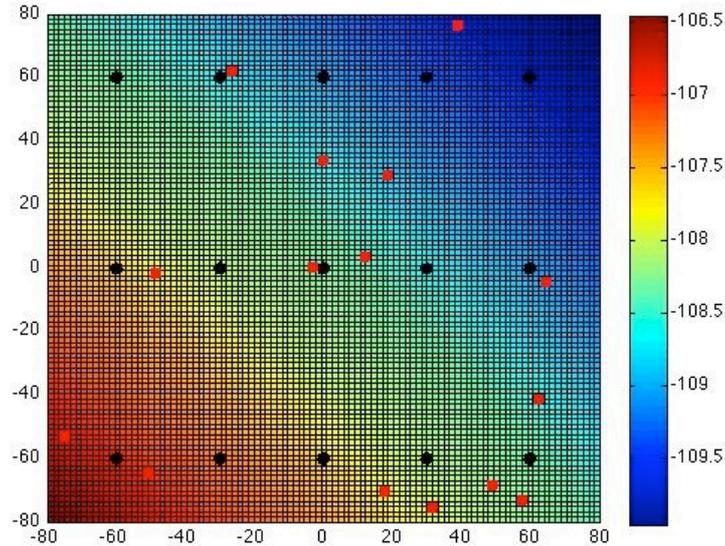


Figura 5.E.4. Esquema de simulación (Caso microcelda)

Respecto a los parámetros femtocelda, seguiremos suponiendo los valores fijados en la Tabla 5.E.1. Para determinar el efecto de la antena micro Nodo B hemos supuesto que se encuentra en la posición (-500, -500), y el modelo de propagación utilizado ha sido el log-normal aplicado a entornos urbanos de baja densidad. En cuanto al resto de parámetros, están detallados en la Tabla 5.E.2.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia transmisión antena microcelda	33	dBm	$P_{tx\ mnb}$
Porcentaje aplicado a servicios HSDPA	80	%	
Ganancia de la antena microcelda	2	dBi	G_m
Perdidas en alimentadores y cableado	1	dB	L_m

Figura 5.E.2. Parámetros de la antena microcelda

En la Figura 5.E.5 mostramos los resultados de la simulación. Lo primero que nos llama la atención es el enorme parecido con el caso en el que no existe antena microcelda cercana, especialmente en el peor de los casos, cuando todas las femtoceldas generan interferencia cocanal. Por otro lado, comprobamos como cuando el porcentaje de femtoceldas interferentes es del 25%, la similitud con la misma curva de la Figura 5.E.3 es menor.

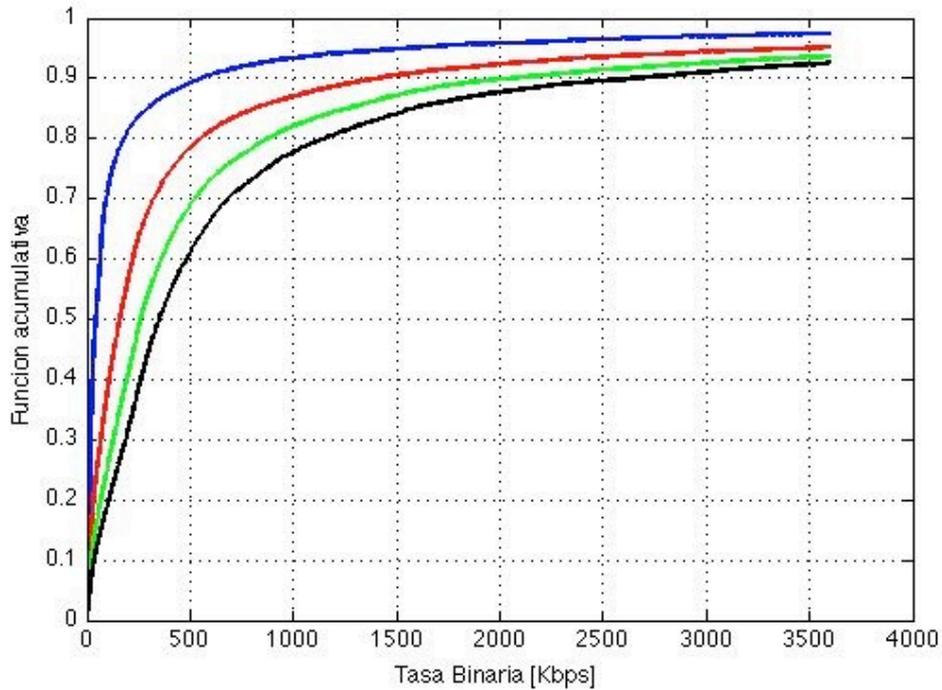


Figura 5.E.5: CDF de la tasa binaria disponible (Caso microcelda)

Los resultados numéricos nos muestran como en un entorno tan negativo como el desarrollado, los usuarios femtocelda difícilmente superarían tasas en torno a los 500 Kbps. Necesitaríamos llegar hasta el percentil noventa para asegurar dicha velocidad al 10% de los usuarios. Suponiendo que solo un porcentaje de todos los puntos de acceso generan interferencia los resultados no muestran una mejoría notable. En el mejor de los casos, donde el 25% de las femtoceldas son nocivas al usuario, solo alcanzaríamos tasas de 500 Kbps a partir del percentil sesentavo, y menos del 10% de los usuarios podrían disfrutar de velocidades por encima de 2,5 Mbps.

Conclusiones

Tras realizar la simulación de gran cantidad de usuarios femtocelda repartidos en un entorno hostil y calcular la función de acumulación correspondiente, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

La primera de ellas consiste en la amenaza que supone la interferencia cocanal entre femtoceldas cercanas. En la Figura 5.E.3 hemos comprobado como en estos casos solo el 10% de los usuarios acceden a tasas por encima de 500 Kbps. Por lo tanto resulta necesario la utilización de un esquema de reutilización de frecuencias. Sin embargo, una de las principales propiedades de las femtoceldas es la instalación por parte del usuario en cualquier lugar de su domicilio. Luego, será el propio punto de acceso femtocelda el encargado de recoger las señales vecinas y determinar que frecuencia se adapta mejor al entorno en el que se encuentra.

A lo largo de largo de las simulaciones realizadas hemos supuesto que el usuario conectado al punto FAP8 podía encontrarse aleatoriamente en cualquier punto de la urbanización. Esta es una de las principales causas de las bajas capacidades obtenidas en

las Figuras 5.E.3 y 5.E.5. Si esperamos una gran movilidad de los usuarios femtocelda existen una serie de mecanismos como la utilización de traspasos hacia otros puntos FAP cercanos o la coordinación entre estaciones base, que permiten al terminal FUE alcanzar una capacidad mayor. Esta última, en conjunto con técnicas de Waterfilling y forzamiento de cero, será aplicada en el capítulo 6 de este proyecto.

Finalmente en la Figura 5.E.5 observamos los resultados cuando nuestro escenario se encuentra bajo la influencia de una microcelda cercana. Cuando todas las femtoceldas utilizan la misma frecuencia comprobamos como los resultados son prácticamente iguales a los obtenidos en la Figura 5.E.3. Por lo tanto podríamos concluir que la antena micro Nodo B no es una de las principales fuentes de interferencia. Sin embargo, cuando el porcentaje de femtoceldas nocivas es menor, comprobamos como los resultados son peores que en la primera simulación. Luego, la existencia de una microcelda cercana afecta a los usuarios femtocelda, especialmente cuando la interferencia producida por los puntos de acceso cercanos es baja.

5.7. Escenario F. Enlace ascendente de un terminal femtocelda vecino interfiere en el receptor de un punto de acceso FAP

Descripción y objetivos

Finalmente analizamos la última posibilidad de interferencia cocanal, en este caso el escenario estudiado consiste en dos apartamentos cercanos equipados con puntos de acceso femtocelda AP1 y AP2. El usuario del punto de acceso 2 realiza una visita a la vivienda de AP1 de modo que se encuentra en el filo de su cobertura. En esta situación en el terminal UE2 se ve obligado a transmitir a plena potencia a fin de contactar con su punto de acceso. Supondremos que dicho usuario se sitúa en una distancia menor de 3 metros, interfiriendo de manera muy agresiva al punto AP1, de modo que se produce una reducción en la cobertura ofrecida por los usuarios conectados a esta femtocelda.

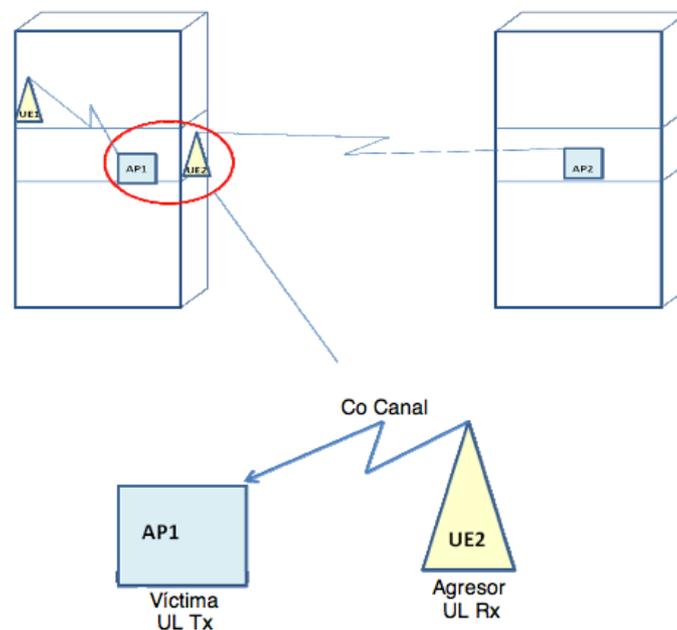


Figura 5.F.1. Escenario F. Detalle de víctima y agresor

Realizaremos un estudio para delimitar la distancia de separación que debe existir entre equipo usuario y punto de acceso cuando existe un terminal cercano conectado a otra antena femtocelda (agresor). Destacar que el método utilizado en este escenario es muy sencillo y debido al esperado aumento de los sistemas femtocelda se podría realizar un estudio más extenso del escenario.

Análisis de la cobertura femtocelda

Asumimos que ambos terminales han establecido una llamada de voz y el usuario UE2 se encuentra muy cercano al punto de acceso AP1. Además, a diferencia de la mayoría de escenarios, el modelo de propagación utilizado será log-normal aplicado a diversas situaciones. El factor límite para mantener una llamada de voz vendrá definido por la relación señal a interferencia, conocida la relación señal a ruido y la ganancia de procesamiento podremos calcular dicho parámetro.

	Valor	Unidades	Comentarios
Tasa binaria de servicio de voz	12,2	Kbps	R
Chip rate	3,84	MHz	W
Ganancia de procesamiento	24,98	dB	$10 \log\left(\frac{W}{R}\right)$
Relación señal a ruido mínima	7	dB	E_c/N_o
Relación señal a interferencia mínima	-18	dB	E_c/I_o

Tabla 5.F.1. Parámetros de simulación

Por lo tanto existirá un compromiso entre la distancia a la que se encuentra el terminal interferente y el usuario UE1 de su punto de acceso. En la Figura 5.F.2 mostramos una sencilla representación de dicho compromiso, podemos observar que cuanto mayor sea el índice de caída del modelo log-normal mayor será la distancia de debe existir entre el usuario UE2 y el punto de acceso.

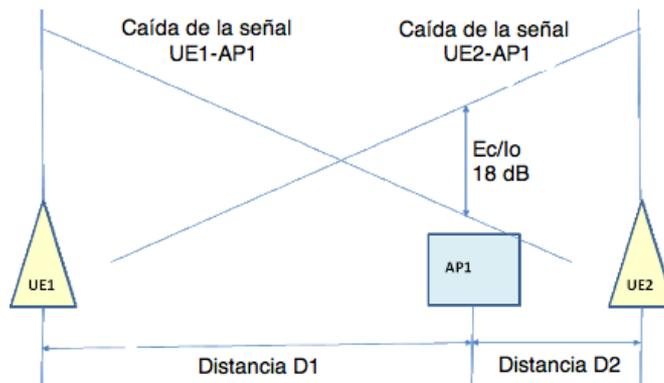


Figura 5.F.2. Representación del compromiso entre distancias D1 y D2

Aplicando el modelo de propagación log-normal, podemos determinar la distancia máxima de separación que debe existir entre AP1 y UE1 para una distancia entre dicho punto de acceso y terminal interferente dada.

$$\begin{cases} PL1 = x + m \log(D1) \\ PL2 = x + m \log(D2) \\ PL2 = PL1 - \frac{Ec}{No} \end{cases}$$

Luego:

$$PL1 - \frac{Ec}{No} = x + m \log(D2) \Rightarrow$$

$$x + m \log(D1) - \frac{Ec}{No} = x + m \log(D2)$$

Finalmente:

$$D2/D1 = 10^{\left(\frac{Ec/No}{m}\right)}$$

Finalmente, en la Figura 5.F.3 generamos un sencillo gráfico de la distancia mínima a la que se puede encontrar el terminal interferente del punto de acceso víctima en función de la que existe hacia el usuario femtocelda UE1. A fin de poder realizar una comparativa de diversas situaciones, calculamos los valores de dicha curva para varios casos, en lo que solo hay pérdidas por propagación, caracterizado para un bloque de oficinas, y para un edificio común cuando la femtocelda se encuentra en la misma planta o existe un salto de 2 niveles entre los equipos.

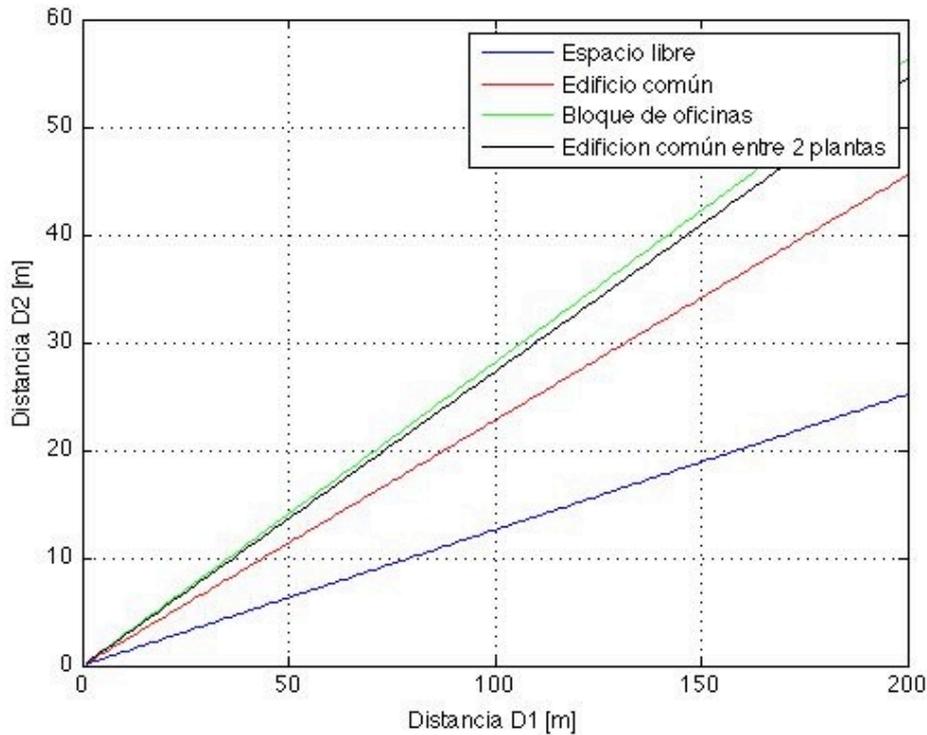


Figura 5.F.3. Compromiso entre distancias D1 y D2

Comprobamos como los mejores resultados se obtienen cuando solo existen pérdidas por propagación en espacio libre. En este caso, si el usuario interferente UE2 se encuentra a solo 5 metros del punto de acceso utilizando toda su potencia disponible, el terminal interferente podría encontrarse a más de 40 metros de distancia. Sin embargo, los resultados bajan considerablemente aplicando el modelo log-normal a casos que se puedan dar en la vida real. Si nos encontramos en un edificio común la distancia entre punto FAP y terminal interferente se reduce a 20 metros para el caso anterior y a 18 metros cuando se trata de un edificio de oficinas o existe una planta de diferencia en edificio común. Por lo tanto será en situaciones en las que las pérdidas sufridas en ambos enlaces son elevadas, cuando mayor precaución debe existir ante este tipo de interferencia.

Conclusiones

A lo largo de este escenario hemos constatado como la aparición de un terminal FUE interferente puede reducir la cobertura ofrecida por la femtocelda. Nos llama la atención la diferencia entre los diferentes entornos simulados. Por ejemplo, en un edificio de oficinas tendremos que tener mayor cuidado con los usuarios interferentes. En este sentido, una solución posible sería utilizar esquemas de coordinación entre estaciones base, de modo que todos los usuarios fuesen tratados por la misma red compuesta por varios puntos de acceso.

Finalmente podemos destacar que los resultados obtenidos son muy buenos, ya que un terminal femtocelda nocivo no afecta en gran medida a la cobertura, de modo que en el caso de interferir desde el canal adyacente, este tipo de interferencia se puede llegar a despreciar.

5.8. Escenario G. Enlace descendente de una macrocelda interfiere en el canal adyacente del enlace descendente del equipo usuario de una femtocelda

Descripción y objetivos

Hasta ahora hemos analizado los posibles casos de interferencia cocanal. En los siguientes escenarios realizaremos un estudio de los casos en los que distintos elementos interfieren desde el canal adyacente. Comenzamos suponiendo la existencia de una serie de terminales femtocelda dentro de un edificio situado a una distancia de 30 metros de un antena macro Nodo B. A fin de maximizar el efecto nocivo de la interferencia, el factor de utilización de la macrocelda será del 50% y el equipo usuario femtocelda se encontrará en el filo de su femtozona. Destacar que la disposición de los elementos es la misma que en el escenario A, sin embargo, en este caso la interferencia se produce en el canal adyacente en frecuencia del receptor FUE.

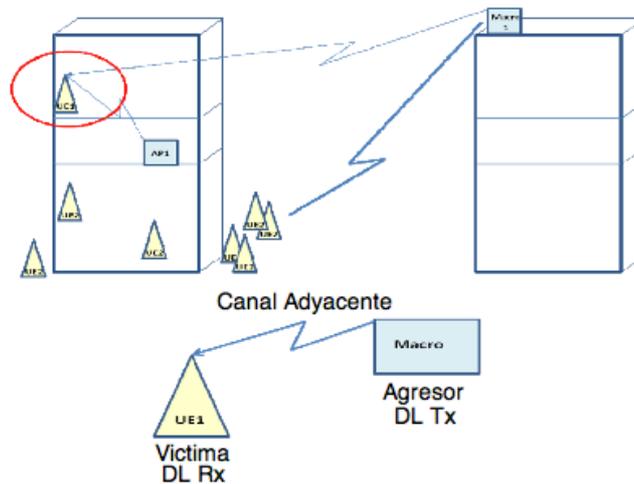


Figura 5.G.1. Escenario G

Utilizaremos un método gráfico muy sencillo para determinar las consecuencias en el rendimiento de nuestro sistema femtocelda cuando la interferencia proviene del canal adyacente de una antena macro Nodo B. Respecto a las pérdidas en el enlace formado por macrocelda y terminal FUE utilizaremos el modelo de propagación en espacio libre añadiendo un valor de pérdidas de penetración al atravesar el aislamiento del edificio. En general, los principales parámetros son:

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia disponible en la macrocelda	43	dBm	$P_{tx \max}$
Utilización de potencia del macro nodo B	50	%	U_t
Potencia transmitida	40	dBm	$P_{tx} = P_{tx \max} + 10 \log(0.5)$

	Valor	Unidades	Comentarios
Ganancia de la antena	11	dB	G_m
Potencia isotrópica efectiva	51	dBm	$EIRP = P_{tx} + G_m$
Pérdidas al atravesar una ventana	6	dB	$L_{\text{aislamiento}}$
Distancia entre macro Nodo B y FUE	30	m	d_{macro}
Pérdidas en el enlace macro Nodo B y FUE	76	dB	$L_{\text{total}} = 38 + 20 \log(30) + L_{\text{aislamiento}}$
Potencia transmitida por la femtocelda	21	dBm	P_{txfap}
Ganancia de la antena en terminal FUE	-3	dB	G_{fap}
Potencia recibida en el canal adyacente en el terminal FUE	-28	dBm	$ACL = EIRP - L_{\text{total}} + G_{\text{fap}}$
Rechazo al canal adyacente en terminal FUE	33	dB	ACS
Nivel de ruido generado por el canal adyacente en el terminal FUE	-61	dBm	$N_{\text{interferencia adyacente}} = ACL - ACS$
Relación señal a ruido mínima	7	dB	E_b/N_o
Ganancia de procesamiento	25	dB	PG

Tabla 5.G.1. Parámetros de simulación

En la Figura 5.G.2 mostramos un esquema de la evolución de la potencia macro y femtocelda recibida en el terminal FUE. Comprobamos como cuando la antena macro Nodo se encuentra muy cercana, puede llegar a generar problemas de cobertura en los usuarios FUE. La macrocelda contribuye al ruido del sistema con un valor de potencia de -61 dBm, lo que añadiendo la ganancia de procesamiento menos la relación E_b/N_o necesaria en un llamada de voz, se sitúa en un valor en torno a los -79 dBm. Es decir, si necesitamos un valor mínimo de señal de -107 dBm, y si al igual que en el escenario A, establecemos un margen de 20 dB para asegurar el mantenimiento de la llamada de voz, nos encontraríamos dentro de la zona crítica, en la que que no podremos asegurar una buena calidad de servicio.

Sin embargo, en el gráfico realizado solo tenemos en cuenta las pérdidas por propagación debidas a los 30 metros de distancia entre terminal y antena, además de las generadas al atravesar la ventana del edificio. En la vida real sería muy poco probable encontrarnos con este tipo de situación, ya que la distancia hacia las antenas macro Nodo B suele ser mayor, y estas no se encuentran cargadas al 50%.

Finalmente destacar que en el caso de un entorno urbano de alta densidad, la antena interferente sería una microcelda con una ganancia inferior. En este caso el margen para mantener la llamada sería mucho mayor, por lo que este tipo de interferencia no supondría ninguna limitación a la hora de implementar un sistema femtocelda.

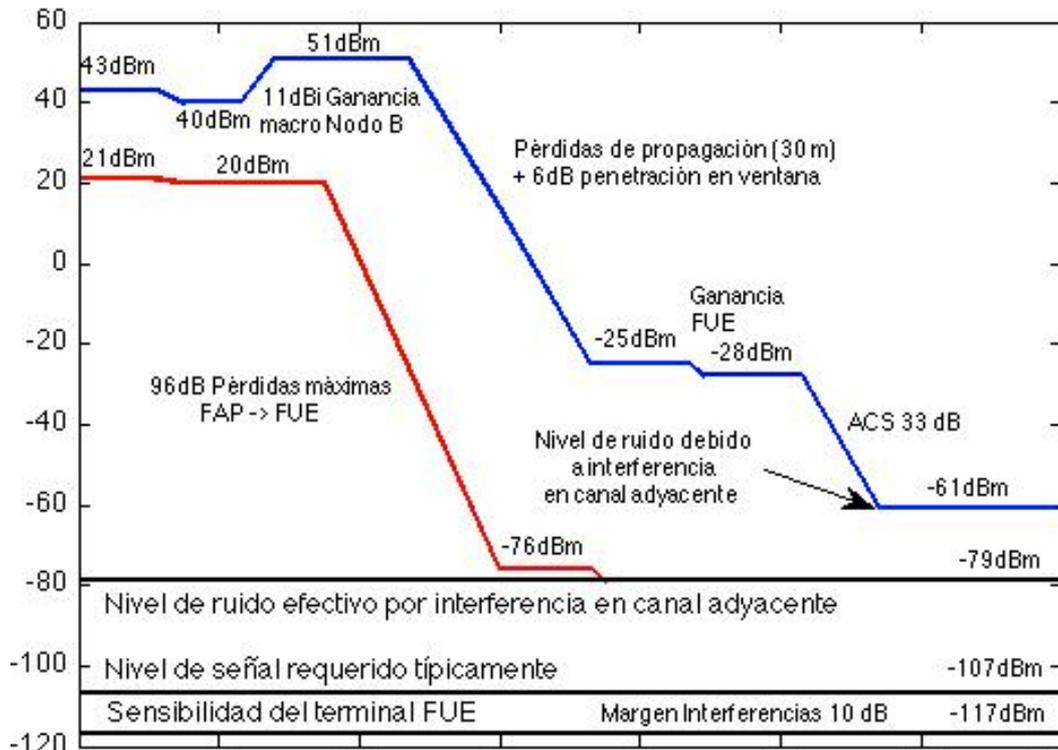


Figura 5.G.2. Evolución de la potencia macro y femtocelda en el terminal FUE

Conclusiones

Tras el análisis de la interferencia creada por el enlace descendente de la macrocelda en el canal adyacente del usuario FUE, podemos concluir que si bien este tipo de interacción puede reducir la calidad de los servicios femtocelda, no supone un gran problema, especialmente en entornos urbanos donde la potencia de la antena macro Nodo B es menor. Volviendo a la referencia [24], la probabilidad de que la potencia recibida de una macrocelda sea superior a -48 dBm es del 0.01%, de modo que en la mayoría de ocasiones, sería posible prestar servicio femtocelda, sin necesidad de utilizar ningún tipo de técnica de gestión de interferencias. A pesar de ello, 3GPP recomienda utilizar control adaptativo de potencia en este tipo de situaciones.

En el caso de que la interferencia sea originada por una microcelda, el canal adyacente es capaz de filtrar esta potencia nociva. Por otro lado, las pérdidas en este tipo de entorno suelen ser mayores que en un enlace macrocelda. De modo que concluimos que la interferencia creada por el canal adyacente de una microcelda puede ser despreciada cuando nos encontramos en escenarios urbanos de alta densidad.

5.9. Escenario H. Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el canal adyacente del enlace ascendente del receptor femtocelda.

Descripción y objetivos

Durante el siguiente escenario estudiaremos el impacto de la potencia emitida por un terminal MUE en el canal adyacente de un receptor femtocelda próximo. Tal y como sucedía en el escenario B, el usuario macrocelda se encuentra en el límite de su cobertura y muy cercano al punto de acceso FAP, de modo que se ve obligado a transmitir con el máximo de potencia disponible. Por otro lado, y para maximizar el efecto nocivo de las interferencias, el terminal FUE se encuentra en el límite de la femtozona. Respecto a la influencia del canal adyacente en el receptor femtocelda hemos tenido en cuenta dos casos. Sabiendo que el enlace ascendente se encuentra en torno a los 1900 MHz, y tanto las antenas del receptor femtocelda como la de los terminales tienen ganancia unidad, el caso I considera una separación en frecuencia de 5 MHz entre los canales transmitidos por MUE y FUE, mientras que en el caso II esta separación es de 10 MHz, por lo que el rechazo al canal adyacente será mayor. Podemos visualizar el escenario en la Figura 5.H.1:

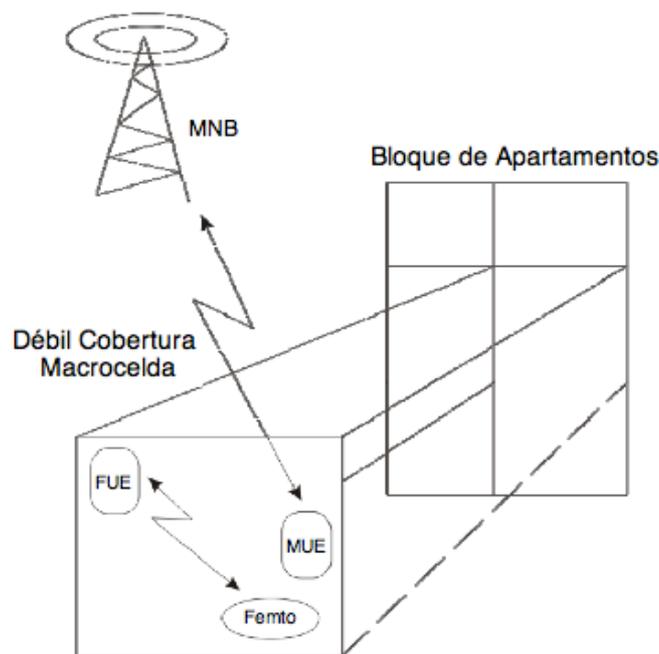


Figura 5.H.1. Escenario H

Nuestro objetivo será analizar el efecto de la interferencia descrita en los servicios de voz AMR 12,2 Kbps y HSUPA. Para ello realizaremos las siguientes simulaciones:

- Cálculo de la distancia mínima que debe existir entre el usuario MUE y punto acceso FAP para poder realizar una llamada de voz desde FUE, en función de la potencia transmitida por el terminal macrocelda.
- Respecto a servicios de alta velocidad HSUPA, obtendremos la relación E_c/N_0 en función de la potencia emitida por el equipo MUE.

Antes de comenzar a analizar el impacto de las interferencias propuestas, realizaremos un breve resumen de los parámetros de simulación comunes tanto a los servicios de voz como de datos HSPA.

	Valor	Unidades	Comentarios
Ancho de banda	3,84	Mbps	W
Bitrate necesario para una llamada de voz	12,2	Kbps	R
Sensibilidad de la antena macro Nodo B	-121	dBm	RxSens
Eb/No necesario para una llamada de voz a 12,2 Kbps	8,3	dB	[T25.104]
Ruido base	-10,432	dBm	$NF = RxSens + 10 \log\left(\frac{W}{R}\right) - Eb/No$
Pérdidas mínimas de acoplamiento entre terminal MUE y femtocelda	45	dB	MCL

Tabla 5.H.1. Parámetros de canal

	Valor	Unidades	Comentarios
Máxima potencia transmitida	10	dBm	Ptx _{fue}
Ganancia de la antena FAP	0	dB	G _{fap}
Figura de ruido	8	dB	F _{fap}
Selectividad del canal adyacente. Caso I*	63	dB	ACS _I
Selectividad del canal adyacente. Caso II**	71	dB	ACS _{II}
Límite de la cobertura femtocelda	-101	dBm	Prx _{fap_min}
Categoría HSUPA del terminal FUE	6 (5,76 Mbps)		C _{FUE}

Tabla 5.H.2. Parámetros femtocelda

- * En el caso I (ACS = 63 dB), la referencia [38] especifica que un punto de acceso FAP podrá detectar y decodificar una llamada de voz AMR cuando la interferencia recibida en el canal adyacente no supere los -38 dBm de potencia, suponiendo un nivel de potencia de señal deseada en torno a -101 dBm (límite de la femtozona).
- * En el caso II (ACS = 71 dB), la referencia [38] especifica que un punto de acceso FAP podrá detectar y decodificar una llamada de voz AMR cuando la interferencia recibida en el canal adyacente no supere una potencia de -30 dBm, suponiendo un nivel de potencia de señal deseada en torno a -101 dBm (límite de la femtozona).

Análisis de los servicios de voz

A lo largo de esta sección analizaremos el efecto de las interferencias generadas por un terminal MUE en el canal adyacente de un sistema femtocelda cuando el usuario FUE hace uso de los servicios de voz. Comenzaremos calculando las pérdidas mínimas que deben existir entre femtocelda y MUE como la diferencia entre la potencia transmitida por el terminal y el nivel de señal interferente que puede asumir el punto de acceso. El modelo de propagación utilizado para determinar las pérdidas en el entorno femtocelda será el ITU P.1238. Una vez conocidas dichas pérdidas, podremos obtener la distancia mínima entre punto FAP y terminal macrocelda. En la Figura 5.H.2 mostramos esta distancia en función de la potencia transmitida por el terminal MUE. Para el caso I realizaremos la simulación con niveles de interferencia máxima aceptada en el receptor de -38 y -28 dBm, mientras que para el caso II únicamente simularemos una potencia interferente de -30 dBm.

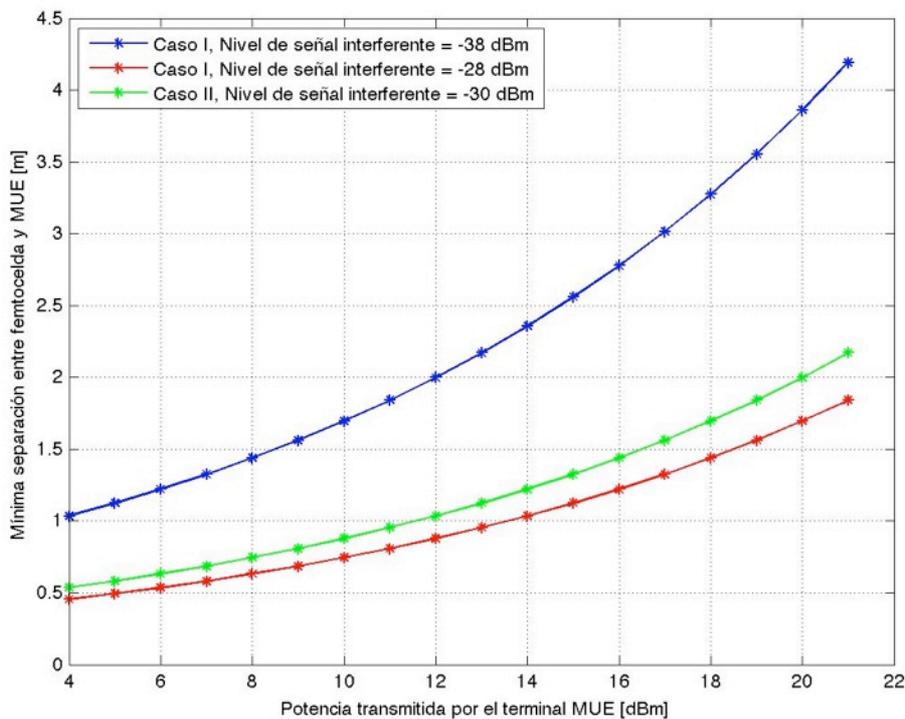


Figura 5.H.2. Separación mínima entre MUE y FAP en función de la potencia transmitida

Para el caso I podemos observar como cuando el equipo usuario MUE transmite con toda su potencia disponible (21 dBm) y la señal interferente es de -38 dBm, la diferencia de 59 dB corresponde con una separación entre terminal y femtocelda de 5.2 m. Esta distancia haría inviable el despliegue de un sistema femtecelda en entornos residenciales, por ejemplo, en un domicilio no sería posible realizar una llamada con un terminal MUE en la misma habitación en la que se encuentra el punto de acceso FAP.

Cuando el nivel de señal interferente es de -28 dBm la distancia entre MUE y FAP se reduce a 1.8 metros en el peor de los casos, comenzando a ser un valor aceptable para el desarrollo de una tecnología inalámbrica. En el caso II, en el que la separación entre canales es mayor, cuando la señal transmitida por el equipo MUE es máxima la distancia mínima entre terminal y punto de acceso es 2.2 m, valor capaz de cubrir una zona de aproximadamente 15 m².

Sin embargo, nos llama la atención la caída abrupta de la separación mínima entre MUE y FAP conforme reducimos la potencia transmitida por dicho terminal. Por ejemplo, cuando ésta es de 6 dBm la distancia se reduce a 1.2 metros para el caso I (-38 dBm) y en torno a 0.5 metros en caso I (-28 dBm) o caso II (-30 dBm). Estos valores comienzan a ser factibles a la hora de implementar nuestro sistema en cualquier hogar, con una distancia de guarda de medio metro bastaría con no situar el terminal MUE en la misma mesa que el punto de acceso para poder aprovechar los servicios ofrecidos por la femtocelda.

Con el fin de aprovechar esta propiedad de nuestro sistema, podríamos utilizar con éxito técnicas de control automático de ganancia (CAG). De esta forma el receptor reduciría su ganancia de forma dinámica cuando las interferencias recibidas por un terminal MUE son elevadas. Obviamente el problema surgido al utilizar CAG consiste en la reducción de la sensibilidad del punto de acceso al reducir su ganancia. Sin embargo, no presenta un gran inconveniente para nuestro sistema ya que normalmente el enlace descendente de la femtocelda se encuentra limitado por la potencia emitida por el terminal FUE y no por el punto de acceso. En la Tabla 5.H.3 demostraremos que se pueden alcanzar coberturas en torno a los 25 metros cuando el terminal FUE transmite únicamente con una potencia de -22 dBm.

	Valor	Unidades	Comentarios
Equipo Usuario Femtocelda FUE			
Potencia transmitida	-22,22	dBm	$P_{tx_{fue}}$
Ganancia de la antena FUE	0	dBi	G_{fue}
Pérdidas debido a cableado y conectores	3	dB	L_c
Potencia isotrópica transmitida	-25,22	dBm	$EIRP = P_{tx_{fue}} + G_{fue} - L_c$
Punto de Acceso Femtocelda FAP			
Ancho de banda	3,84	MHz	B
Densidad de ruido termal	-174	dBm/Hz	tnd
Figura de ruido del receptor	8	dB	NF
Densidad de ruido en el receptor	-166	dBm/Hz	$rnd = tnd + NF$
Potencia de ruido en el receptor	-100,16	dBm	$rnp = rnd + 10 \log(B)$
Margen de interferencia	-3	dB	I_m
E_b/N_0 mínimo	6,5	dB	E_b/N_0
Ganancia de codificación	25	dB	PG
E_c/I_0 mínimo	-18,5	dB	$E_c/I_0 = E_b/N_0 - PG$

	Valor	Unidades	Comentarios
Sensibilidad de receptor	-115,66	dBm	$Sens = rnp + \frac{Ec}{No} - I_m$
Ganancia de la antena FAP	0	dBi	G_{fap}
Pérdidas debido a cableado y conectores	0	dB	L_{fap}
Margen de Slow Fading	-6	dB	M_{slow}
Margen de Fast Fading	-3	dB	M_{fast}
Pérdidas permitidas en la femtocelda	81,44	dB	$L_{cell} = EIRP - Sens - G_{fap} + L_{fap} + M_{slow} + M_{fast}$
Cobertura femtocelda	26,48	m	Cobertura femtocelda

Tabla 5.H.3. Cobertura femtocelda utilizando CAG

Por lo tanto podremos aplicar CAG, de modo que reduciendo la ganancia en el punto FAP conseguimos suavizar el nivel de potencia interferente recibida, a consta de aumentar la potencia transmitida por el terminal FUE.

Análisis de los servicios HSUPA

El siguiente paso será analizar los servicios HSUPA ofrecidos en nuestro escenario de interferencias. Al igual que en el escenario B tomaremos como referencia el canal FRC #3 detallado en la referencia [38]. El cual se caracteriza por requerir una relación Ec/No superior a 2.4 dB en el canal DPDCH para ofrecer una tasa binaria del 30% respecto al máximo de su capacidad, y de 9.1 dB para llegar al 70%. Destacar que la máxima tasa binaria en el canal FRC 3 es de 4059 Kbps de acuerdo con [38].

El modo de determinar las prestaciones de nuestro sistema ha sido suponer una distancia entre MUE y FAP constantes, además de unas pérdidas entre terminal femtocelda y punto FAP de 90 dB. Una vez establecido el nivel de señal deseada, variaremos la potencia transmitida por el terminal MUE (interferencia) calculando la relación señal a ruido en el receptor femtocelda. En la Figura 5.H.3 comenzaremos analizando el caso en el que la separación entre MUE y FAP se mantiene en 2 metros y el máximo de potencia interferente admitida es de -38 dBm. A continuación, repetimos la simulación para el caso en el que la separación entre MUE y FAP es de 5 metros mostrando los resultados en la Figura 5.H.5.

En este caso comprobamos como a pesar de la escasa distancia entre terminal macrocelda y FAP, es necesario que éste llegue a transmitir una potencia superior a 1 dBm para que el nivel de interferencia comience a perjudicar a la calidad del canal DPDCH. Por debajo de este valor podemos despreciar el nivel de señal interferente frente al ruido en el receptor femtocelda. Por lo tanto, en el caso de utilizar un canal adyacente, la relación Ec/No depende principalmente de la potencia transmitida por el usuario FUE. Cuando la potencia es superior a 0 dBm podremos asegurar capacidades por encima de los 2.8 Mbps, mientras que con solo descender hasta los -5 o -10 dBm la capacidad comienza a situarse en torno a los 1.6 Mbps o por debajo de 1.2 Mbps respectivamente

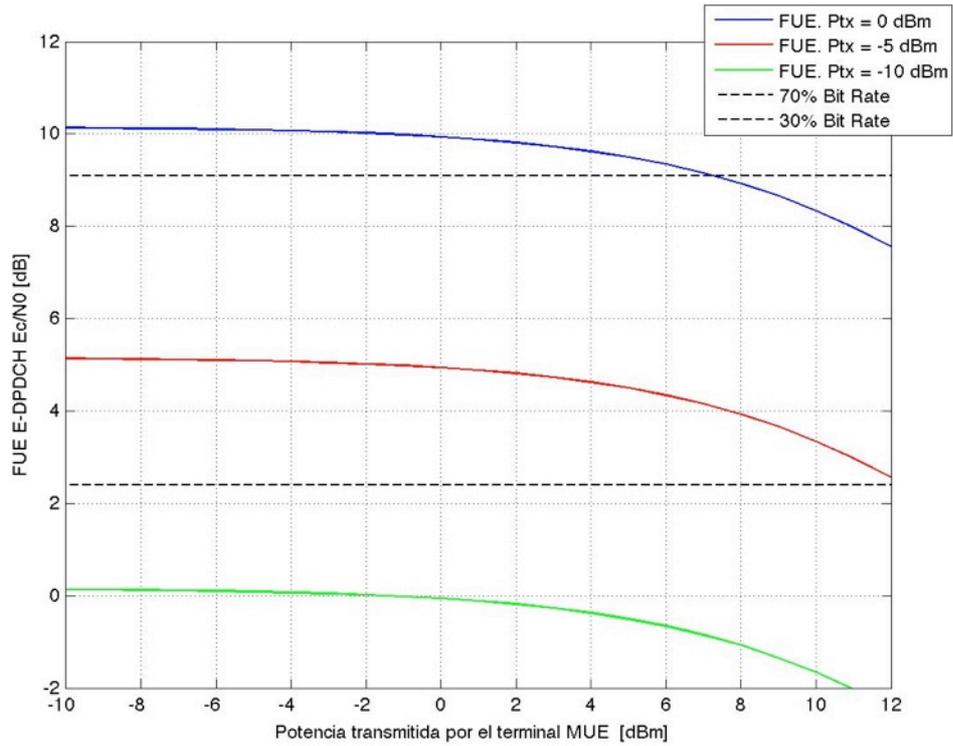


Figura 5.H.3. Relación Ec/No. Distancia MUE FAP de 2 metros

Para la segunda simulación, la distancia entre usuario interferente y receptor es mayor. En la Figura 5.H.4 observamos, tal y como era de esperar, una mejora en los resultados respecto al caso anterior. Ahora es necesario que el terminal MUE se acerque al máximo de su potencia disponible para comenzar a afectar a la relación señal a ruido obtenida en el punto FAP. Respecto a la capacidad disponible en función de la potencia transmitida por el usuario femtocelda, podremos asegurar tasas superiores a 1.2 Mbps si éste utiliza un nivel de señal superior a -5 dBm.

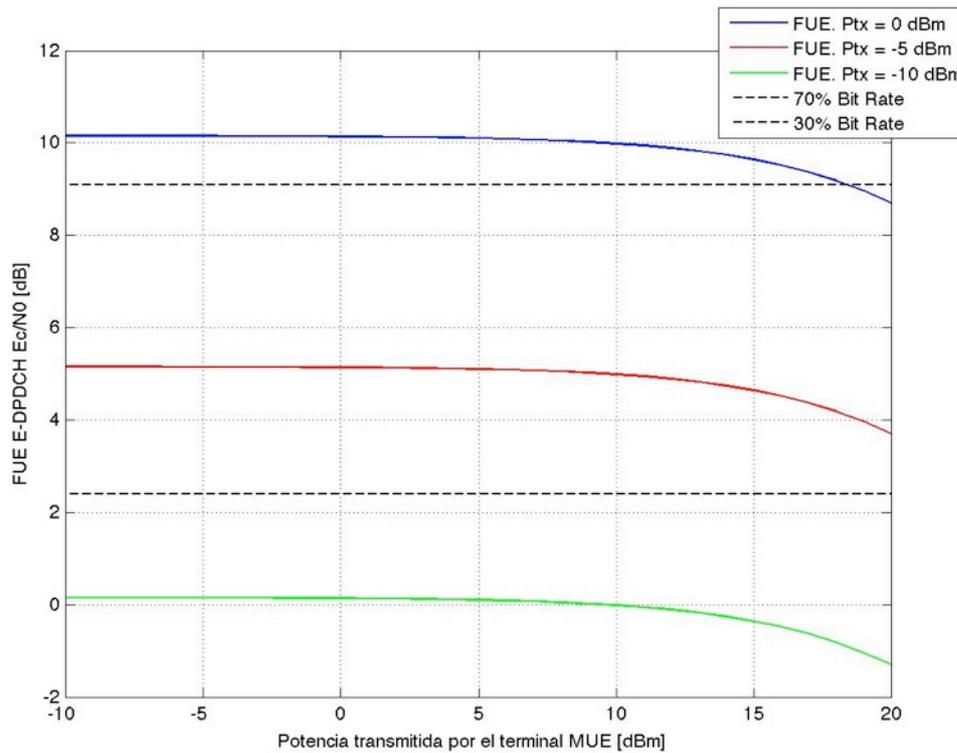


Figura 5.H.4. Relación E_c/N_0 . Distancia MUE FAP de 5 metros

Conclusiones

Tras analizar el impacto de un terminal MUE cercano en el canal adyacente de un punto de acceso femtocelda podemos llegar a las siguientes conclusiones:

En la primera sección hemos comprobado el efecto de la interferencia en el canal adyacente del punto de acceso. En el peor de los casos, cuando la frecuencia utilizada por el terminal MUE se encuentra muy cercana al canal en el que opera la femtocelda, en torno a 5 MHz, la distancia mínima entre usuario MUE y punto FAP debe ser de 5.2 metros si el terminal utiliza toda su potencia. En el resto de los casos estudiados, esta distancia era de 1.8 y 2.2 metros, es decir, no podríamos utilizar servicios femtocelda en un área de 15 m² en torno al terminal MUE. Este tipo de restricción haría muy difícil la comercialización de la tecnología femtocelda, por ello, proponemos la utilización de control automático de ganancia. De este modo el punto de acceso FAP es capaz de disminuir la ganancia de su receptor cuando detecte niveles altos de interferencia, aumentando la relación E_c/N_0 del enlace entre terminal FUE y punto FAP.

Para servicios de datos a alta velocidad, en las Figuras 5.H.3 y 5.H.4 podemos observar como hasta valores muy elevados de potencia transmitida por el terminal MUE, en torno a 12 dBm si se sitúa a 2 metros, la relación E_c/N_0 permanece constante. Según las medidas tomadas por los operadores, la probabilidad de que un terminal MUE utilice una potencia superior a 15 dBm es menor del 3%. Por ello podemos concluir que en situaciones normales la interferencia generada por el terminal macrocelda no supondrá un factor limitador de la tasa binaria ofrecida a los usuarios femtocelda.

5.10. Escenario I. Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor del equipo usuario macrocelda.

Descripción y objetivos

A lo largo del siguiente escenario analizaremos el impacto del enlace descendente femtocelda en el canal adyacente de un terminal MUE. El terminal conectado a la antena macro Nodo B no pertenece al grupo cerrado creado por femtocelda, a pesar de encontrándose muy cercano al punto de acceso FAP y en el límite de su cobertura macrocelda. Supondremos la existencia de dos equipos FUE y MUE dentro del mismo apartamento, en el que la intensidad de la señal ofrecida por la antena macro Nodo B es muy débil. Con la finalidad de maximizar el efecto de dichas interferencias el punto de acceso FAP hará uso de toda su potencia disponible. En la Figura 5.1.1 encontramos un sencillo esquema de nuestro escenario.

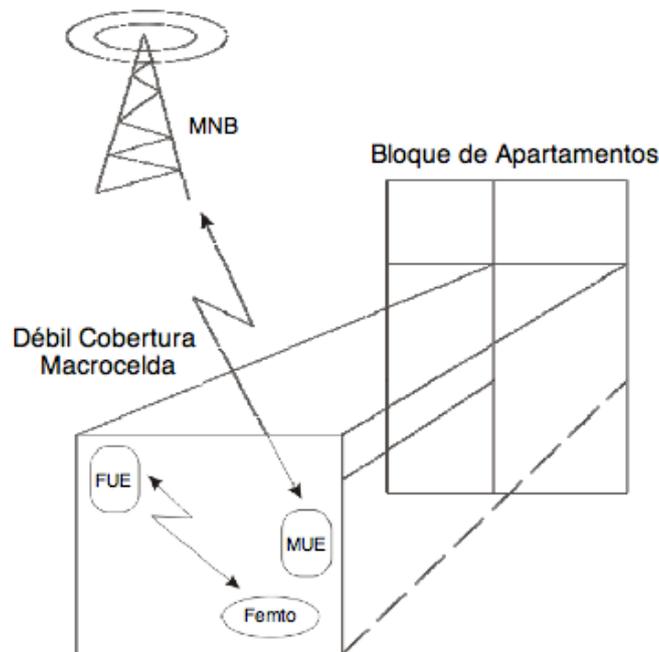


Figura 5.1.1. Escenario I

Tal y como sucedía en secciones anteriores, nuestro objetivo será analizar el impacto de las interferencias descritas en los servicios de voz AMR 12,2 Kbps y de transferencia de datos a alta velocidad HSDPA. Para ello determinaremos la máxima separación que debe existir entre antena macro Nodo B y equipo usuario MUE en función de la distancia entre este terminal y el punto de acceso femtocelda.

El punto de partida de nuestras simulaciones serán los parámetros especificados por el 3GPP en la referencia [39] para servicios de voz y datos, suponiendo terminales de categoría diez capaces de ofrecer una tasa binaria de 14,4 Mbps. A continuación mostramos una serie de tablas con todas las consideraciones realizadas en el desarrollo del siguiente escenario.

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia total transmitida	43	dBm	$P_{tx_{ue}}$
Potencia asignada a servicios HSDPA	42	dBm	$P_{tx_{HSDPA}}$
Potencia transmitida en el canal DCH	33	dBm	$P_{tx_{DCH}}$
Ganancia de la antena macro Nodo B	17	dBi	G_m
Pérdidas en alimentadores y cableado	3	dB	L_m

Tabla 5.I.1. Parámetros de la antena macrocelda

	Valor	Unidades	Comentarios
Máxima potencia de transmisión	21	dBm	$P_{tx_{mue}}$
Ganancia de la antena MUE	0	dBi	G_{mue}
Sensibilidad del terminal	-117	dBm	$Sens_{mue}$
Ruido de base	-106,7	dBm	N_{mue}
Selectividad del canal adyacente	33	dB	ACS
Máxima entrada de potencia interferente	-25	dBm	I_{max}

Tabla 5.I.2. Parámetros del terminal macrocelda

	Valor	Unidades	Comentarios
Potencia de transmisión	{5,10,15,21}	dBm	$P_{tx_{fap}}$
Ganancia de la antena FAP	0	dBm	G_{fap}

Figura 5.I.3. Parámetros del punto de acceso femtocelda

A la hora de modelar las pérdidas debidas a la propagación en entornos urbanos utilizaremos el modelo COST 231 Hata, añadiendo unas pérdidas de penetración de 20 dB debido al muro externo que la señal debe sortear para acceder al apartamento. Respecto a las pérdidas dentro de éste aplicaremos el modelo ITU P.1238 caracterizado a esenario residenciales.

En la Figura 5.I.2 mostramos la región de operación de nuestro sistema, dentro de la cual llevaremos a cabo la próximas simulaciones. Representamos el nivel máximo de interferencia que puede soportar el terminal MUE en función de la potencia recibida originada en la antena macro Nodo B.

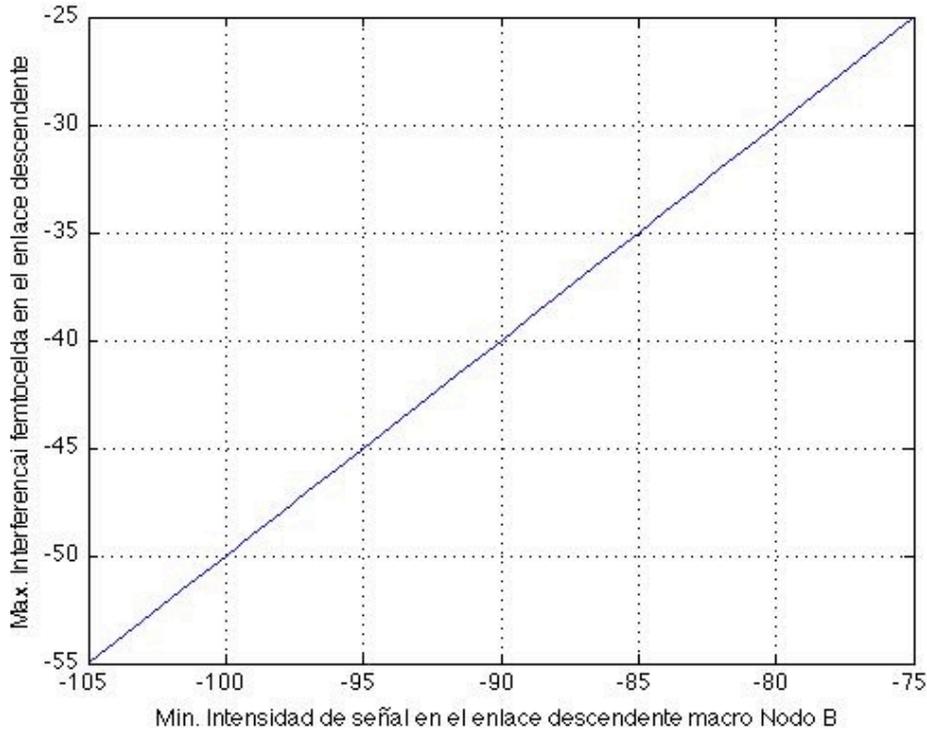


Figura 5.1.2. Región de operación

Análisis de los servicios de voz

Destacar que cada punto de la región de operación puede convertirse en un distancia límite entre terminal MUE y antena macro Nodo B en función de la separación que exista entre femtocelda y usuario MUE. En la Figura 5.1.3. podemos observar el impacto de las interferencias creadas por la femtocelda en términos de distancia. El método llevado a cabo para calcular estos valores ha sido determinar las pérdidas máximas a partir de nuestra región de operación y una vez realizado, calcular la distancia teniendo en cuenta los modelos de propagación definidos para cada entorno.

Como era de esperar, la distancia máxima para que el usuario MUE contacte con la macrocelda crece rápidamente conforme dicho terminal se aleja del punto de acceso FAP. En este sentido podemos afirmar que las interferencias generadas por una femtocelda no suponen un factor clave, siempre y cuando el equipo MUE se encuentre relativamente cerca de la antena macro Nodo B.

Nos llama la atención la diferencia que existe en la mínima separación entre femtocelda y MUE para cada nivel de potencia conforme aumenta la distancia hacia la antena macro Nodo B. Si mantenemos un espacio constante de 1 kilómetro a la antena macrocelda, es necesaria una distancia de 5.2 metros entre punto de acceso y usuario MUE para que éste pueda detectar cobertura cuando la potencia transmitida por la femtocelda es de 10 dBm. Sin embargo, si aumentamos la potencia hasta los 21 dBm esta distancia llega a ser superior a 13 metros, valor que resulta inviable a la hora de realizar una implementación real de sistema femtocelda. En este sentido, podemos concluir que el factor que delimita las prestaciones del sistema es la distancia hacia la antena macro Nodo B, si ésta se encuentra a distancias inferiores a medio kilómetro basta con que el usuario MUE se sitúe a una distancia inferior a 4.8 metros para asegurar cobertura macrocelda.

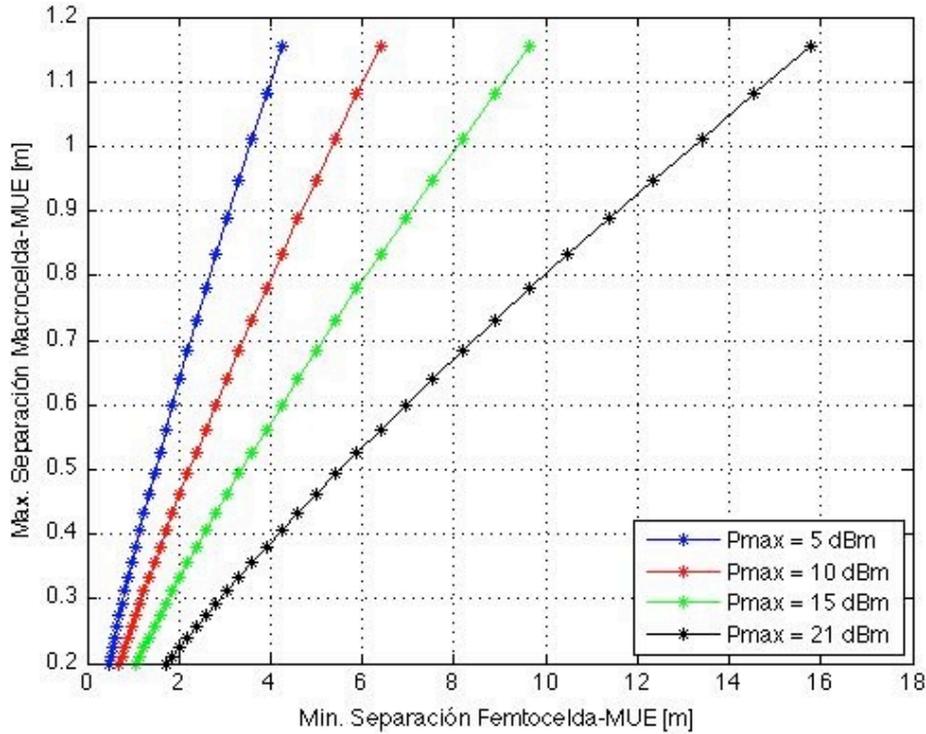


Figura 5.1.3. Distancia máxima entre MNB y MUE para servicios de voz

El siguiente paso será analizar con detalle el efecto de la femtocelda en el usuario MUE cuando éste se sitúa muy próximo al punto de acceso FAP. En la Tabla 5.1.4 mostramos la máxima separación entre MUE y macrocelda si la distancia entre terminal y FAP se encuentra fijada a 2 metros. Calculamos esta distancia variando la potencia transmitida por la femtocelda desde los 0 dBm hasta el límite establecido en 21 dBm. Podemos comprobar como la distancia entre macrocelda y MUE comienza a tomar valores críticos, por encima de medio kilómetro, cuando la femtocelda utiliza niveles de potencia superiores a 10 dBm.

Potencia transmitida por la femtocelda [dBm]	Máxima separación entre macro Nodo B y MUE [Km]
0	0,8
2	0,7
5	0,6
7	0,55
10	0,45
15	0,32
17	0,29
21	0,22

Tabla 5.1.4. Distancia máxima entre MNB y MUE cuando la distancia hacia FAP es de 2 metros.

Finalmente analizaremos el impacto de la interferencias en canal CPICH del enlace macrocelda. Si la calidad de la señal en canal del control de fases es demasiado pequeña, resultará imposible realizar una llamada desde el terminal MUE. En estos casos se crea en torno al punto FAP lo que en este proyecto hemos denominado “zonas muertas”, donde los servicios macrocelda ofrecidos son nulos a pesar de estar dentro de la cobertura teórica ofrecida por la antena macro Nodo B. De acuerdo con la referencia [40] del 3GPP, para el caso de interferencia desde el canal adyacente, suponiendo un valor de -76 dBm en el parámetro RSSI, estas zonas muertas se encuentran en torno a los 40 dB para una potencia máxima de transmisión de 10 dBm en FAP y alrededor de 50 dB si la potencia transmitida en la femtocelda es de 20 dBm. Aplicando el modelo ITU P.1238 dichos valores corresponden a una distancia de 0.8 y 1.9 metros respectivamente. En el caso de encontrarnos en el límite de la cobertura macrocelda (RSSI = -103 dBm) las “zonas muertas” vienen dadas por unas pérdidas de 60 y 70 dB para las mismas potencias de transmisión en el punto de acceso. Es decir, una separación de 4.2 y 9.6 metros utilizando nuestro modelo de propagación en interiores. Llegados a este punto, nos damos cuenta de que la separación entre femtocelda y MUE calculada en la Figura 5.1.3 es menor que el radio de las zonas muertas especificadas. Por lo tanto éste será factor el que realmente nos limitará el funcionamiento de un terminal MUE cercano a un punto de acceso femtocelda. En este escenario el 3GPP recomienda una potencia máxima de transmisión en FAP de 10 dBm, lo que supondría que la “zona muerta” de 4 metros de radio alrededor de punto de acceso.

Impacto en los servicios HSDPA

A continuación determinaremos el impacto de las interferencias creadas desde el canal adyacente del punto FAP en el terminal macrocelda, cuando este hace uso de servicios HSDPA. Utilizaremos el modelo de canal PA3 definido en la referencia [39], de modo que utilizando equipos de categoría diez la capacidad máxima será de 14.4 Mbps. Los valores medios de rendimiento vienen dados por una tasa de 3219 Kbps utilizando una modulación QPSK y 4689 Kbps para 16QAM. Utilizando la referencia [39], los parámetros mínimos para poder ofrecer servicio HSDPA serán los siguientes:

Parámetro	Valor		Unidades
Modelo de canal	PA3 (Peatón A)		
loc	-60		dBm
lor/loc	10		dB
Ec/lor	-6	-3	dB
R, QPSK	1407	2090	Kbps
r, 16QAM	887	1664	Kbps

Tabla 5.1.5. Parámetros HSDPA

Mediante un sencillo balance de enlace, calculamos la distancia mínima entre macrocelda y MUE suficiente para mantener la mínima calidad de canal, la cual corresponde a 0.6, 1 y 1.6 metros cuando la femtocelda transmite una potencia de 10 dBm, 15 dBm y 21 dBm respectivamente. A partir de estos valores realizaremos una simulación para determinar la distancia máxima entre terminal y antena macro Nodo B en función de la distancia a la que se encuentre del punto de acceso FAP. Podemos observar los resultado en la Figura 5.1.4:

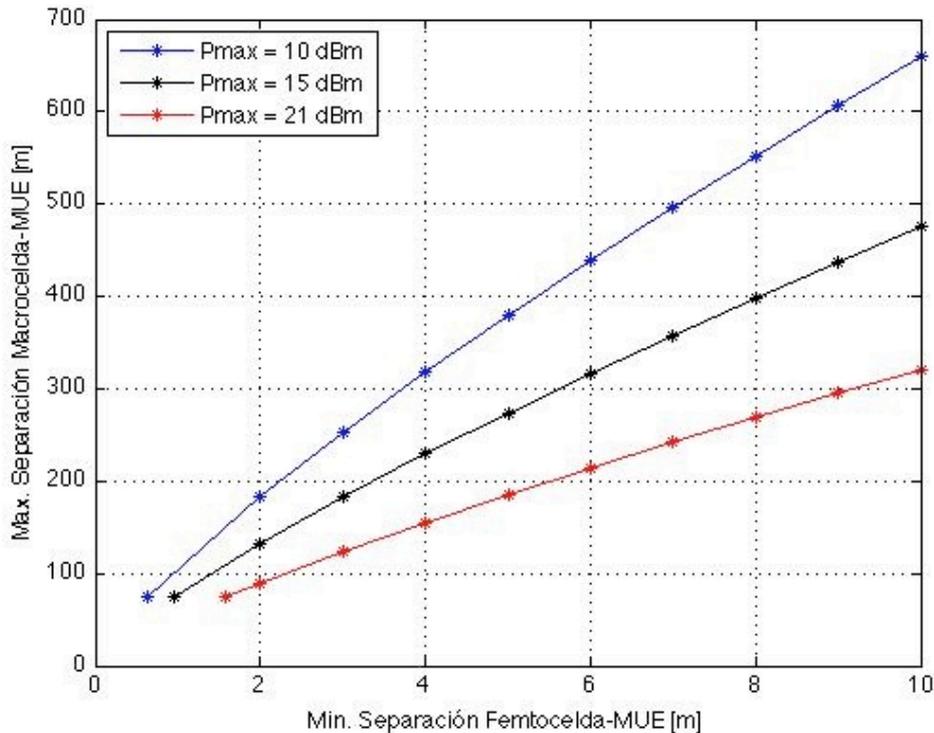


Figura 5.1.4. Distancia máxima entre MNB y MUE para servicios HSDPA

Llegados a este punto recordar la existencia de una zona muerta alrededor del punto FAP con un radio de 4 metros. En el peor de los casos, si la femtocelda transmite a plena potencia y el usuario MUE se encuentra en el filo de dicha zona muerta, bastaría con que la antena macro Nodo B estuviese a una distancia menor de 150 metros para poder ofrecer servicios HSDPA a su usuario. Esta condición se relaja hasta 220 y 380 metros cuando la potencia de transmisión desciende a 15 y 10 dBm respectivamente. Como es lógico la distancia máxima entre MUE y antena macrocelda aumenta conforme el terminal se aleja de la zona muerta creada por la femtocelda. Sin embargo, sabemos que para alcanzar tasas binarias elevadas en servicios HSDPA, es necesario que el usuario se encuentre muy cercano a la antena macro Nodo B. Por lo tanto, cuando la interferencia femtocelda se realiza desde el canal adyacente, ésta no será la principal causa del bajo rendimiento HSDPA.

Conclusiones

Una vez presentado el análisis de los servicios de voz y datos ofrecidos por la antena macro Nodo B cuando el usuario macrocelda es víctima de interferencia femtocelda generada en su canal adyacente, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

Cuando el terminal MUE se encuentra en la misma habitación que el punto de acceso FAP, en torno a 2 metros de radio, es necesario que la distancia entre éste y la antena macrocelda sea menor de 300 metros. Sin embargo, alrededor del punto FAP aparecerá una zona muerta, donde es imposible acceder a servicios macrocelda. El radio de esta zona tiene un rango desde 4.2 hasta 9.6 metros, luego hasta que el usuario MUE supere estas distancias los servicios ofrecidos por la antena macro Nodo B son independientes de la cercanía a su usuario.

Tal y como propusimos en el escenario C, una posible solución al fenómeno de las zonas muertas es el uso de control adaptativo de potencia, de modo que la femtocelda sea sensible al entorno compuesto por las antenas macro Nodo B que la rodean. Por ejemplo, el punto de acceso FAP puede reducir su nivel máximo de potencia de transmisión si detecta señal macrocelda muy débil, mientras que puede aumentarla cuando ésta es mayor.

Respecto al servicio de datos HSDPA disponible en el terminal MUE, en la Figura 5.1.4 hemos comprobado como cuando el usuario se encuentra en el filo de la zona muerta creada por la femtocelda, éste debe situarse a distancias menores de 150 metros de su antena macro Nodo B. Sin embargo, en una red macrocelda la capacidad ofrecida a sus usuarios depende principalmente de la distancia hacia la antena encargada de ofrecer servicio HSDPA. Por lo tanto la distancia máxima entre antena macrocelda y MUE calculada no será el factor que nos limite la tasa binaria de cada usuario. Concluimos que exceptuando las zonas muertas, la interferencia creada por la femtocelda en este escenario no supone una limitación en la velocidad de datos HSDPA accesible al usuario MUE.

5.11. Escenario J. Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor de la antena microcelda (Nodo B)

Descripción y objetivos

En el siguiente escenario analizaremos el efecto nocivo de los equipos usuario femtocelda en el canal adyacente del receptor de una antena microcelda. Tal y como sucedía en el escenario D, el terminal FUE se encuentra cercano a una ventana del apartamento y en el filo de su femto cobertura, de modo que tiene visión directa hacia la antena micro Nodo B y se ve obligado a transmitir a plena potencia a fin de poder contactar con su punto de acceso femtocelda.

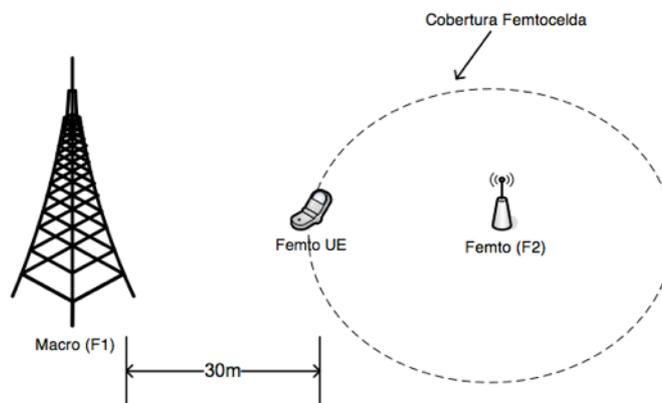


Figura 5.J.1. Escenario J

Siguiendo la estructura del resto de escenarios. El objetivo de esta sección es analizar el efecto de las interferencias descritas en los servicios de voz y datos. El modo de cuantificar el impacto de la aparición de terminales FUE dentro de la cobertura microcelda será mediante lo que hemos denominado incremento de ruido, el cual afecta directamente a la sensibilidad de la antena receptora micro Nodo B.

Realizaremos un análisis de los servicios de voz AMR 12,2 Kbps cuando un terminal FUE realiza una llamada utilizando toda su potencia disponible. En este apartado configuraremos la antena microcelda teniendo en cuenta el Release 99 del 3GPP y suponiendo que ésta ofrece servicio a un equipo MUE el cual se encuentra en la misma posición que el terminal FUE.

Análisis del servicio de voz

Durante esta sección analizaremos el efecto de las interferencias descritas en los servicios de voz de nuestro sistema. Calcularemos el incremento de ruido en bornas de la antena micro Nodo B cuando existen terminales FUE operando en un canal adyacente el cual se encuentra a una distancia de ± 5 MHz.

La configuración de la microcelda resulta muy similar a la utilizada en el escenario D. En este caso volveremos a suponer que se trata de una estación base de media distancia, con una sensibilidad inicial de -111 dBm y cuya ganancia es de 2 dBi. Teniendo en cuenta la ganancia de codificación utilizada y la relación señal a ruido necesaria para establecer una

comunicación por voz, la base de ruido de nuestra antena será de -94,32 dB. El cálculo de este valor se encuentra detallado en la Tabla 5.D.1.

Los pasos llevados a cabo para medir la interacción de los terminales femtocelda entre los distintos elementos de la red microcelda han sido los siguientes:

1. Cálculo de la cobertura ofrecida por el punto FAP, teniendo en cuenta el nivel de interferencia creado por el canal adyacente de una antena micro Nodo B situada a una distancia de 30 metros.
2. Determinar la potencia de transmisión del usuario femtocelda, cuando éste se encuentra en el límite de la cobertura calculada en el paso 1. Además tendremos en cuenta las interferencias generadas por un terminal FUE cercano.
3. Finalmente calcularemos el incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a la potencia emitida por el terminal femtocelda.

1. Cobertura ofrecida por la femtocelda

La antena micro Nodo B se encuentra muy cercana a nuestro sistema femtocelda, de modo que la cobertura se ve limitada por la potencia interferente causada por la microcelda. Utilizando la ecuación 5.J.4 la cobertura ofrecida por el punto de acceso FAP se encuentra en torno a los 89,4 dB de pérdidas.

Las suposiciones realizadas han sido las siguientes:

- Será necesario un valor mínimo de -16 dB en la relación señal a interferencia para poder realizar una llamada de voz bajo la condición $I_{propia}/I_{otras} = -1dB$.
- Factor de ortogonalidad de $\alpha = 0.9$
- Potencia máxima de la femtocelda en el enlace descendente de 10 dBm
- Selectividad frente a canal adyacente de 33 dB
- Potencia total transmitida por la antena micro Nodo B de 38 dBm
- Factor de utilización de ambas antenas del 50 %
- El punto de acceso femtocelda asignará un 10% de la potencia disponible para llamadas de voz.
- Pérdidas en el enlace desde la antena micro Nodo B al terminal FUE caracterizadas por el modelo ITU P.1411, en esta caso 74.06 dB.

El rendimiento en el canal DPCH “Downlink Didicated Physical Channel” de la femtocelda operando en cocanal con una antena micro Nodo B puede ser modelado como la relación de la potencia recibida desde el punto de acceso FAP entre la potencia interferente originada en la microcelda y en la propia femtocelda (factor de ortogonalidad distinto de 1). Es decir:

$$\left(\frac{E_c}{I_0} \right) \Big|_{DCH_{voice}} = \frac{P_{femto-llamada} / L_{femto}}{\left(0.5(1 - \alpha) P_{femto-total} / L_{femto} \right) + P_{micro-interferencia}} \quad \text{Ecuación 5.J.1}$$

Además, utilizando la referencia [41], la relación E_c/I_0 en el canal DCH para llamadas de voz 12k2 puede mostrarse como:

$$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_{DCH_{voice}} = \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH} \times \left[(1 - \alpha) + \frac{1}{I_{propia}/I_{otras}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 5.J.2}$$

Y el valor de la interferencia generada por la microcelda en el canal adyacente vendrá dada por:

$$P_{\text{micro-interferencia}} = 10^{(P_{\text{micro-total_dB}} - 3 - L_{\text{micro-femto_dB}} - ACS)/10} \quad \text{Ecuación 5.J.3}$$

Finalmente, sustituyendo el valor de la interferencia microcelda y especificando la relación E_c/I_0 en el canal DCH en función de la del canal DPCH llegaríamos a la siguiente ecuación:

$$L_{\text{femto_dB}} = -10 \log \left[\frac{P_{\text{micro-interferencia}} \times \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}}{P_{\text{femto-llamada}} - \left(0.5(1 - \alpha)P_{\text{femto-total}} \left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}\right)} \right] \quad \text{Ecuación 5.J.4}$$

Donde:

L_{femto}	pérdidas de propagación entre FAP y FUE
$L_{\text{micro-femto}}$	pérdidas de propagación entre FUE y micro Nodo B
$P_{\text{micro-interferencia}}$	potencia interferente microcelda que llega al terminal FUE
$P_{\text{femto-llamada}}$	potencia asignada por la femtocelda a una llamada de voz
$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_{DCH_{voice}}$	relación señal a interferencia necesaria del canal DCH
$\left(\frac{E_c}{I_{or}}\right)_{DPCH}$	relación señal a interferencia mínima del canal DPCH
$P_{\text{femto-total}}$	potencia total transmitida por la femtocelda
α	Factor de ortogonalidad del enlace descendente femtocelda
I_{propia}/I_{otras}	relación interferencia entre la propia celda y el resto

Tras realizar todo el proceso, determinamos que las pérdidas que delimitan la cobertura femtocelda son de:

$$L_{\text{femto}} = 89,4 \text{ dB}$$

2. Potencia transmitida por el terminal FUE

En la siguiente tabla mostramos el proceso llevado a cabo para determinar la potencia interferente transmitida por los terminales FUE dentro de la cobertura microcelda.

	Valor	Unidades	Comentarios
Frecuencia	2100	MHz	Enlace Descendente
Pérdidas entre FUE y femtocelda	38	dB	L_{fsl}
Ancho de banda	3,84	MHz	B
Densidad de ruido termal	-174	dBm/Hz	tnd
Figura de ruido del receptor	8	dB	NF
Densidad de ruido en el receptor	-166	dBm/Hz	$rnd = tnd + NF$
Potencia de ruido en el receptor	-100,16	dBm	$rnp = rnd + 10 \log(B)$
Carga de la antena	50	%	L
Incremento de ruido debido a la carga	3,01	dB	$IM = -10 \log\left(1 - \frac{L}{100}\right)$
Potencia transmitida en terminal FUE cercano	-50	dBm	P_{fue}
Interferencia en el receptor femtocelda generada por el terminal FUE	-88	dBm	$P_{fue} _{rec} = P_{mue} - L_{fsl}$
Ruido de Base en en receptor femtocelda	-87,5	dBm	$trnp = 10 \log\left(\sum_{lineal} P_{fue} _{rec} + rnp + IM\right)$
Tasa Binaria del terminal	12,2	Kbps	R
Chip Rate	3,84	MHz	W
Ganancia de procesamiento	24,98	dB	$10 \log\left(\frac{W}{R}\right)$
Relación Eb/No mínima	8,3	dB	$\frac{E_b}{N_0}$ [canal DCH]
Señal mínima para detectar un terminal femtocelda	-104,18	dBm	$P_{f \min} = trnp - PG - \frac{Eb}{No}$
Pérdidas entre FUE y punto de acceso	89,35	dB	DL_{cov}
Potencia transmitida en terminal FUE	-1.483	dBm	$\min(21, \max(P_{f \min} + DL_{cov}, -50))$

Figura 5.J.1. Potencia interferente transmitida por el usuario femtocelda**3. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B**

Finalmente procedemos a calcular el incremento de ruido teniendo en cuenta una potencia transmitida por un terminal FUE de -14,83 dBm.

	Valor	Unidades	Comentarios
Ganancia de la antena Nodo B	2	dBi	G_{ant}
Pérdidas en alimentadores y conectores	1	dB	L_f
Ruido de base en la antena	-94,32	dBm	Tabla 5.D.1
Potencia transmitida en el terminal FUE	-14,83	dBm	P_{fue}
Ganancia de la antena terminal	0	dBi	$G_{m_{ant}}$
Potencia isotrópica transmitida por los terminales femtocelda	-14,83	dBm	$P_{fue_eirp} = P_{fue} + G_{m_{ant}}$
Pérdidas al atravesar una ventana	5	dB	L_w
Pérdidas totales entre FUE y Nodo B	74,06	dB	$L_{tot} = Loss_{ITU P1411}(30m) + L_w$
Selectividad del canal adyacente	33	dB	ACS (\pm 5MHz)
Interferencia del terminal FUE recibida en el conector de la antena microcelda	-104,18	dB	$P_{fue_red} = P_{fue_eirp} - L_{tot} + G_{ant} - L_f - ACS$
Valor por encima del ruido de base	89,35	dB	R
Incremento de ruido	0,01	dBi	$NR = 10 \log(1 + 10^{0.1R})$

Tabla 5.J.2. Incremento de ruido en la antena microcelda

Una vez calculado el incremento de ruido para un único terminal, extendemos nuestro resultado para el caso en el que existan varios terminales. Al igual que en el escenario D, solo tenemos que sumar las interferencias generadas por los terminales femtocelda. Podemos observar los resultados obtenidos en la Figura 5.J.2.

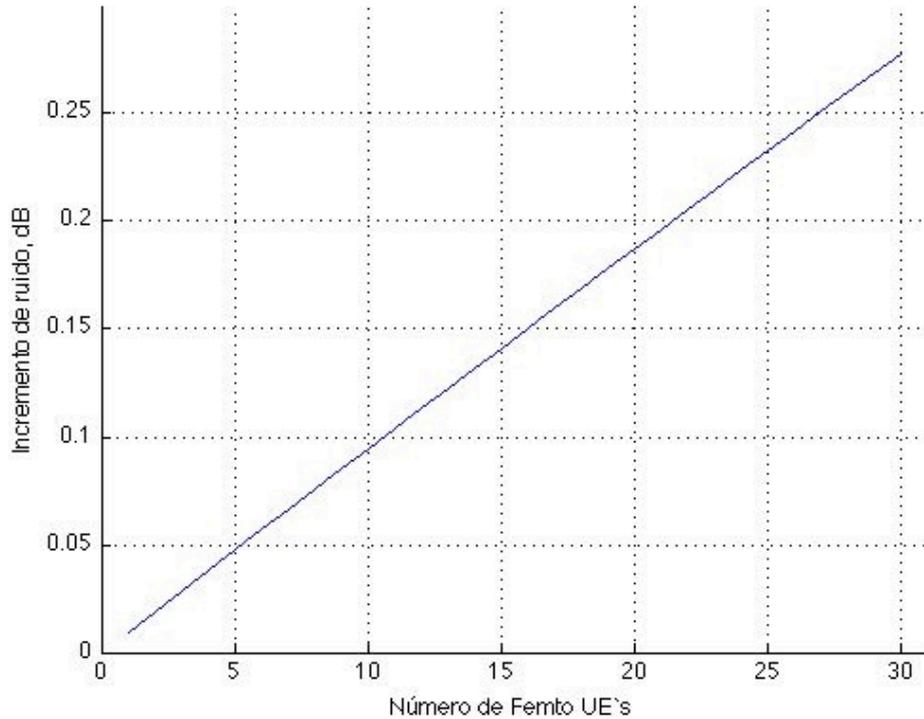


Figura 5.J.2. Incremento de ruido en la antena micro Nodo B debido a múltiples usuarios FUE

Ahora el incremento de ruido es mucho menor que en el caso en el que la interferencia tenía origen en los terminales femtocelda trabajando en el mismo canal que la antena micro Nodo B. Por ejemplo, si existiesen 25 usuarios FUE transmitiendo a plena potencia, el incremento de ruido sería de solo 0.25 dB, lo que resulta despreciable para las prestaciones de la antena micro Nodo B. Comparando con los resultados obtenidos en la Figura 5.D.2 comprobamos como en el caso cocanal el incremento de ruido se multiplica aproximadamente por tres.

Conclusiones

Tras el análisis del escenario J podemos concluir que la interferencia generada por los terminales FUE en el canal adyacente no supone un problema grave en la antena micro Nodo B. En este sentido, el incremento de ruido producido en este tipo de situación es tres veces menor que en el caso cocanal. Sin embargo, ante la posibilidad de que en algún momento gran cantidad de usuarios femtocelda transmitan a plena potencia, existen técnicas de gestión por parte de los puntos de acceso para minimizar dichas interferencias. Permitiendo realizar un traspaso hacia otras frecuencias donde la contribución al incremento de ruido en la antena micro Nodo B sea menor.

Capítulo 6

Coordinación entre puntos de acceso femtocelda

Coordinación entre puntos de acceso femtocelda

6.1. Descripción y Objetivos

Hasta ahora nos hemos centrado en analizar y determinar la influencia de las posibles interferencias dentro de un escenario femtocelda. Durante el siguiente capítulo vamos a estudiar la aplicación de mecanismos de coordinación entre estaciones base con el fin de crear puntos de acceso trabajando para ofrecer un mejor servicio global. El principal beneficio de aplicar este tipo de técnicas consiste en la posibilidad de eliminar las interferencias cocanal y poder reutilizar constantemente la misma banda de frecuencia, tanto en femto como en macro o micro celdas.

Comenzaremos realizando una breve descripción de las diversas técnicas que han surgido para la eliminación de la OCI “other-cell interference” tales como la multiplexación por división espacial basada en tecnologías MIMO o la reutilización de frecuencias UFR “Universal Frequency Reuse”. Una vez establecida la comunicación cooperativa como mejor modelo para gestionar la interferencia entre femtoceldas, realizaremos una serie de simulaciones en los siguientes escenarios:

- 2 estaciones base con 2 terminales
- 2 estaciones base con 2 terminales bajo cobertura macro/micro celda
- 15 estaciones base con 15 terminales
- 15 estaciones base con 15 terminales bajo cobertura microcelda

6.2. Introducción

Normalmente el modo de combatir las interferencias en sistemas celulares ha sido la reutilización de frecuencias a costa de disminuir la eficiencia espectral. En este caso era necesario realizar una planificación detallada de asignación de frecuencias a cada celda, sin embargo dicha asignación sería casi imposible de realizar en sistemas femtoceldas por dos razones. La primera de ellas es el tamaño y número de estas celdas, en sistemas macrocelda, donde cada frecuencia abarca zonas de centenares de metros se puede realizar un mapa muy conciso en el que se puede definir el nivel de interferencia existente en la misma banda de frecuencia. Pero en sistemas femtocelda la distancia entre estaciones base es mínima, y se espera que en entornos urbanos la densidad de este tipo de sistemas sea elevada, por lo que un plan de frecuencias sería muy complejo y debería ser actualizado casi a diario. Por ejemplo en el caso de que cada día aparezcan nuevos usuarios en una zona con gran densidad de viviendas. La segunda razón consiste en cumplir el objetivo de que cada punto de acceso sea instalado en cualquier parte de la vivienda por el mismo usuario.

De modo que el operador no puede llegar a conocer la posición exacta de cada femtocelda, luego en el caso de utilizar un esquema de reutilización de frecuencias, sería una mera aproximación ya que se desconocería la posición exacta, o incluso si el usuario ha apagado su punto de acceso.

Por otro lado la tecnología MIMO apareció como solución para conseguir altas capacidades en cualquier ámbito de las telecomunicaciones, sin embargo este tipo de tecnología requiere un valor elevado de relación señal a ruido más interferencia SINR, propiedad que es muy difícil de conseguir en sistemas celulares debido a la influencia de las interferencias originadas otras celdas. Además hay que tener en cuenta el tamaño y sobre todo el precio final de un sistema femtocelda, por lo que la utilización de más de una antena tanto en terminales y puntos de acceso no sea aconsejable a la hora de comercializar el producto.

En los casos en los que cada punto de acceso conoce el nivel de interferencia procedente del resto de transmisores, podremos eliminar la interferencia entre celdas (OCI) utilizando DPC junto con la aplicación de un esquema de forzamiento a cero (ZF). Básicamente consiste en precodificar los datos de modo que se pueda llegar a cancelar el efecto de las interferencias.

El siguiente paso consiste en aplicar cooperación entre elementos de un sistema MIMO. Concretamente en la referencia [35] se realiza una comparación entre sistemas competitivos, en el que cada estación base transmite a su único usuario y sistemas cooperativos, es decir, varias antenas trabajando por un mismo objetivo. En dicho estudio muestran como en el caso de que los sistemas no cooperen entre si, existe un único punto de equilibrio de Nash, el cual resulta ineficiente en términos de tasa binaria.

Finalmente, nos centraremos en aplicar la técnica de transmisión coordinada en estaciones base junto con la utilización de esquemas de Waterfilling desarrollada en la referencia [37].

6.3. Modelo de sistema

A fin de simplificar nuestro modelo todo lo posible, únicamente tendremos en cuenta la existencia de dos estaciones base BS y dos usuarios móviles MS operando en la misma banda de frecuencia. Podemos observar un esquema de nuestro modelo en la Figura 6.1:

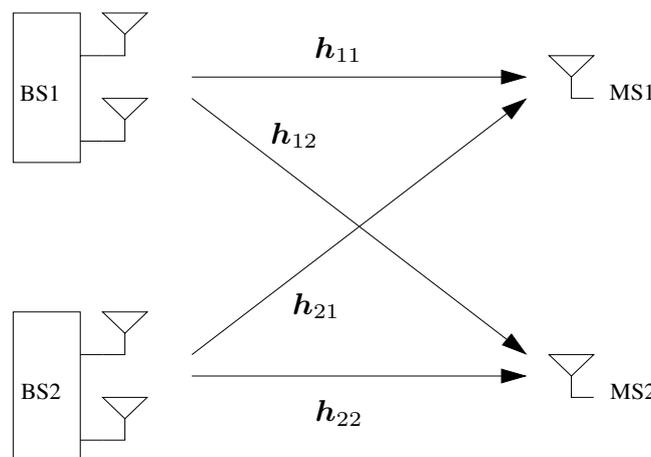


Figura 6.1: Esquema de coordinación con dos usuarios interferentes

Supondremos que la transmisión de símbolos se realiza mediante codificación escalar y que los canales de propagación son planos en el dominio de la frecuencia. Entonces la señal recibida en cada uno de los estaciones MS vendrá dada por:

$$\begin{aligned}y_1 &= h_{11}^T w_1 s_1 + h_{21}^T w_2 s_2 + e_1 \\y_2 &= h_{22}^T w_2 s_2 + h_{12}^T w_1 s_1 + e_2\end{aligned}$$

Donde s_1 y s_2 son los símbolos transmitidos, h_{ij} es el valor del canal donde el vector $n \times 1$ corresponde al canal entre la estación base BS_i y el terminal MS_j , w_i son los pesos asignados a cada terminal y e_i corresponde al ruido en cada elemento.

La única restricción que existe en nuestro sistema será la siguiente:

$$\|w_i\|^2 \leq 1, \quad i=1,2 \text{ [Restricción de energía]}$$

Llegados a este punto, la pregunta fundamental consiste en determinar el valor de los pesos w_1 y w_2 de modo que se pueda conseguir el mayor beneficio global en nuestro sistema. Para ello discutiremos la aplicación de estaciones base no coordinadas y la utilización de esquemas ZF con coordinación entre estaciones base.

Solución no cooperativa

En este caso no existe cooperación entre BS_1 y BS_2 , y ambas deben competir por la utilización del espectro que se les ha sido asignado. De modo que las tasas binarias obtenidas en cada terminal vendrán dadas por las siguientes ecuaciones.

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{|w_1^T h_{11}|^2}{|w_2^T h_{21}|^2 + \sigma^2} \right) [bps / Hz] \text{ Para el enlace } BS_1 \rightarrow MS_1$$

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{|w_2^T h_{22}|^2}{|w_1^T h_{12}|^2 + \sigma^2} \right) [bps / Hz] \text{ Para el enlace } BS_2 \rightarrow MS_2$$

Podemos comprobar que se trata de la ecuación clásica $R = \log_2(1 + SINR)$ donde la interferencia proviene de la estación base encargada de transmitir la señal correspondiente al terminal contrario.

De este modo resulta evidente que el punto de equilibrio de Nash se encuentra cuando ambos usuarios utilizan todo su ancho de banda disponible. Para poder optimizar nuestro sistema todo lo posible (equilibrio), es necesario encontrar los pesos w_1^{ne} y w_2^{ne} de modo que:

$$\begin{aligned}\log_2 \left(1 + \frac{|w_1^{neT} h_{11}|^2}{|w_2^{neT} h_{21}|^2 + \sigma^2} \right) &\geq \log_2 \left(1 + \frac{|w_1^{neT} h_{11}|^2}{|w_2^{neT} h_{21}|^2 + \sigma^2} \right) \text{ y} \\ \log_2 \left(1 + \frac{|w_2^{neT} h_{22}|^2}{|w_1^{neT} h_{12}|^2 + \sigma^2} \right) &\geq \log_2 \left(1 + \frac{|w_2^{neT} h_{22}|^2}{|w_1^{neT} h_{12}|^2 + \sigma^2} \right)\end{aligned}$$

Entonces resulta trivial que existe un único punto de equilibrio de Nash puro correspondiente a maximizar la señal enviada por cada estación base.

$$w_1^{ne} = \frac{h_{11}}{\|h_{11}\|} \quad y \quad w_2^{ne} = \frac{h_{22}}{\|h_{22}\|}$$

La demostración resulta inmediata, si BSi utiliza cualquier otro valor de w_i capaz de satisfacer la restricción de energía, la tasa binaria obtenida siempre será menor.

Llegados a este punto, tenemos que especificar que a la hora de aplicar esta solución en nuestro escenario femtocelda, hemos supuesto que todos los puntos de acceso transmiten con su máximo de potencia disponible, fijada en 10 dBm para este caso.

Solución cooperativa

Utilizando la referencia [35] comenzaremos realizando un esquema de forzamiento de cero ZF, de modo que la estación BS1 no crea energía interferente hacia el equipo MS1 y viceversa. En este caso, si asumimos que ambas estaciones base deben transmitir el máximo de potencia disponible, la estación BS1 debe elegir un peso w_1 ortogonal a h_{12} y que a la vez maximice el producto $|w_1 h_{11}|$. Este peso viene dado por la siguiente expresión:

$$w_1^{ZF} = \frac{\Pi_{h_{12}}^\perp h_{11}}{\|\Pi_{h_{12}}^\perp h_{11}\|}$$

Donde $\Pi_X^\perp = I - X(X^H X)^{-1} X^H$ es la proyección ortogonal sobre el espacio columna de X.

Del mismo modo:

$$w_2^{ZF} = \frac{\Pi_{h_{21}}^\perp h_{22}}{\|\Pi_{h_{21}}^\perp h_{22}\|}$$

Gracias a utilizar este tipo de esquema las tasas binarias de cada estación móvil vendrán dadas por las siguientes expresiones:

$$R_1^{ZF} = \log_2 \left(1 + \frac{|w_1^{ZF T} h_{11}|^2}{\sigma^2} \right) [bps / Hz] \quad y \quad R_2^{ZF} = \log_2 \left(1 + \frac{|w_2^{ZF T} h_{22}|^2}{\sigma^2} \right) [bps / Hz]$$

Destacar que el proceso llevado a cabo en [37], el cual será utilizado en nuestras simulaciones, realiza un proceso de ortogonalización por usuario, es decir, no existirá interferencia entre los distintos terminales. Sin embargo, si las estaciones MS constan de varias antenas, los símbolos recibidos entre ellas si causaran interferencias que podrán ser eliminadas por el usuario mediante otro tipo de técnicas. En el caso de sistemas femtocelda los equipos FUE únicamente disponen de una antena, de modo que podremos asegurar que no habrá interferencias en este tipo de usuarios.

Tras realizar el esquema ZF aplicamos un esquema de gestión de recursos según la referencia [37]. El resultado de este último paso, será conocer la cantidad de potencia que debe transmitir cada estación base para optimizar la tasa binaria ofrecida por nuestro sistema. Dentro de [37] encontramos dos estrategias diferenciadas. La primera de ellas consiste en determinar el mejor punto de funcionamiento con la restricción de que la potencia transmitida debe ser igual en cada una de las estaciones base. La segunda

consiste en aplicar Waterfilling de modo que la potencia disponible se distribuya entre las estaciones base maximizando el beneficio global del sistema. Además cabe la posibilidad de aplicar prioridades, de modo que ciertos usuarios puedan tener prioridades frente al resto. Sin embargo no utilizaremos este tipo de planteamiento en las simulaciones realizadas, y todos los usuarios serán tratados equitativamente. En este punto cabe destacar que los resultados obtenidos aplicando Waterfilling siempre serán mejores que en el caso en el que la potencia transmitida sea igual en ambas estaciones base.

Una vez efectuada esta breve introducción de las técnicas aplicadas, procedemos a mostrar los resultados de las simulaciones realizadas. Destacar que los desarrollos matemáticos de dichas técnicas se encuentran planteados con mayor detalle en las referencias [35][37].

6.4. Simulación en distintos escenarios

6.4.1. Escenario A. Dos puntos de acceso con dos terminales

Comenzaremos desarrollando un sencillo escenario en el que existen dos puntos de acceso cercanos, pertenecientes a distintos usuarios separados por un muro cuyas pérdidas de penetración son de aproximadamente 12 dB. En este escenario, el usuario 2 realiza una visita a su vecino de modo que sigue conectado con su punto de acceso, el cual se ve obligado a transmitir al máximo de su potencia disponible para poder contactar con el terminal, al mismo tiempo el usuario UE1 requiere servicios femtocelda a su correspondiente punto de acceso. Durante esta situación la interferencia entre celdas será máxima. Podemos visualizar un sencillo esquema del escenario en la siguiente figura:

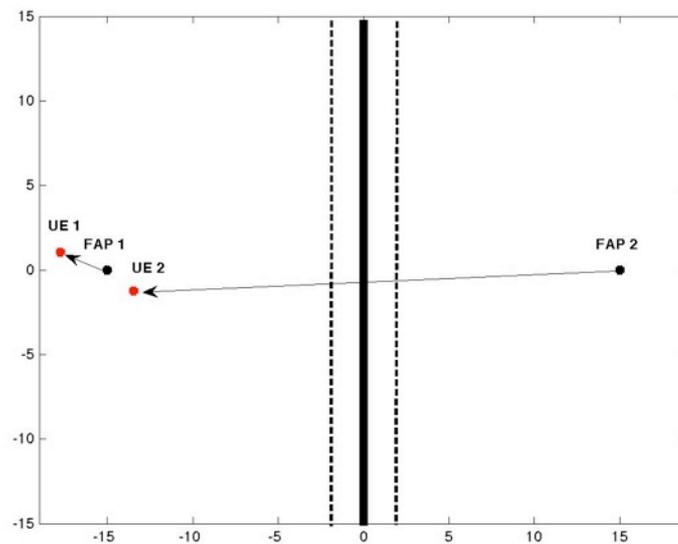


Figura 6.2: CBST Escenario A

Realizamos una serie de simulaciones en las que los puntos de acceso no se encuentran coordinados. Para el usuario 1 los resultados obtenidos siempre son la máxima tasa binaria, fijada en 14.4 Mbps por segundo ya que se encuentra a distancias muy cortas de su punto de acceso, llegando a recibir valores óptimos de potencia en su canal HSDPA. Por lo tanto, debido a la escasa información que supondría, no mostraremos la función acumulativa del terminal UE1 Sin embargo para el usuario 2 hemos comprobado cómo la

posición en la que se encuentre dentro del apartamento de su vecino sí que es significativa. Tras realizar en torno a diez mil simulaciones con posiciones aleatorias dentro del apartamento 1 los resultados fueron los siguientes:

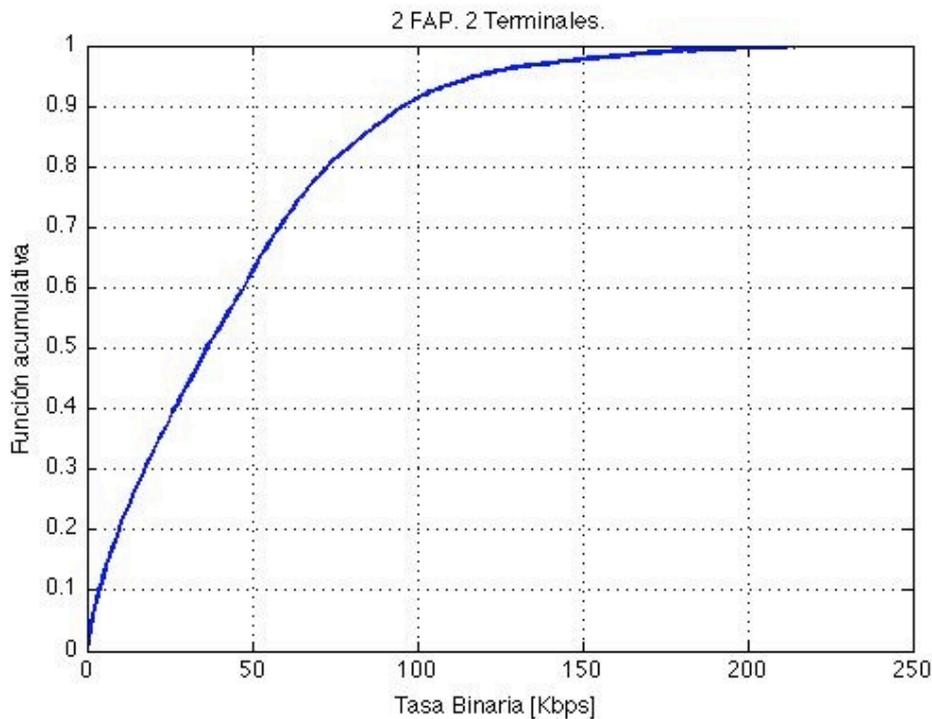


Figura 6.3: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado

En el caso de no utilizar coordinación entre estaciones base podemos observar como las tasas binarias conseguidas en el usuario visitante son muy pequeñas. Alrededor del percentil 50 de nuestra función acumulativa la capacidad del terminal UE2 se encuentra en torno a los 40 Kbps. Destacar que con este nivel de prestaciones seríamos capaces de realizar una llamada de voz AMR a 12.2 Kbps, sin embargo esta muy lejos de ofrecer un servicio de datos aceptable teniendo en cuenta los servicios demandados actualmente. Tendríamos que llegar hasta el percentil 90 para obtener una tasa binaria de 100 Kbps, cercana a la actual “velocidad reducida” ofrecida por los operadores cuando el usuario supera la cantidad de datos contratada.

Por lo tanto podemos concluir que existe una gran penalización en los servicios ofrecidos cuando un usuario se aleja de su femtozona para entrar en otra cercana. En lugares en los que debería de obtener una tasa binaria de varios Mbps tan solo puede aspirar a realizar llamadas de voz y acceder a un servicio de datos paupérrimo. Sin embargo el usuario vecino UE1, disfruta de la máxima velocidad ofrecida por el punto de acceso FAP1. La gran diferencia entre los servicios disponibles en cada uno de los terminales, nos lleva a proponer un esquema de coordinación entre estaciones base como solución al conflicto que surge cuando dos femtoceldas se encuentran muy cercanas entre sí.

El siguiente paso ha sido realizar una serie de simulaciones aplicando la técnica de coordinación y Waterfilling desarrollada en la referencia [37]. Comenzamos utilizando el escenario descrito anteriormente, en el que el usuario UE2 se encuentra muy cercano al punto de acceso FAP1 (Caso I). Además hemos decidido repetir la simulación cuando los dos terminales UE1 y UE2 se encuentran situados aleatoriamente en cualquier punto de

nuestro escenario (Caso II). Al utilizar coordinación buscamos el beneficio global de ambos usuarios, de modo que en nuestra función acumulativa mostramos la media de la tasa binaria de los dos usuarios. Podemos observar los resultados en la Figura 6.4:

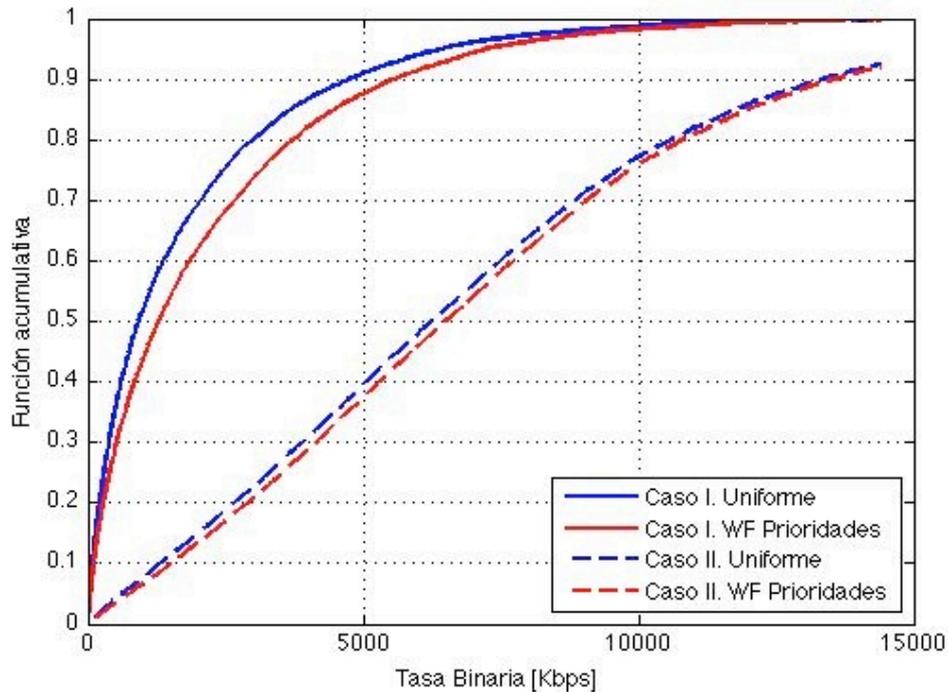


Figura 6.4: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado

Lo primero que nos llama la atención es la diferencia entre Caso I y Caso II. Este hecho se debe a que en el primer caso el punto FAP1 apenas cuenta con apoyo de FAP2 debido a la diferencia de distancia entre los terminales y dichos puntos de acceso, menos de 3 metros a FAP2 y en torno a 30 metros más un muro a FAP1. A lo largo de la simulación mostrando la asignación de potencias a cada estación base dirigida a cada terminal, en el Caso I se pudo observar como el punto FAP1 se encontraba obligado a dividir equitativamente toda su potencia disponible entre los dos terminales, mientras que la potencia emitida en FAP2 apenas conseguía mejorar la relación SINR en dichos terminales.

Como ya hemos especificado, el caso I trata una situación extrema en la que una estación base se encuentra mucho más cargada que otra. En el caso II obtenemos mejores resultados debido a que ahora la utilización de coordinación entre puntos de acceso es mucho más efectiva. Resulta lógico, ya que ahora aumenta la posibilidad de que las dos antenas realicen una contribución alta a ambos terminales. De hecho, el mejor resultado se obtendrá cuando los usuarios se sitúan a medio camino entre FAP1 y FAP2, ya que se maximiza la potencia recibida por ambas estaciones base.

Otro aspecto a tener en cuenta es la utilización de Waterfilling o utilizar la misma potencia en todos los transmisores. En la Figura 6.4 podemos observar como existe mayor diferencia entre aplicar estas dos técnicas en el caso I, cuando los dos terminales se encuentran muy cercanos a las estación FAP1, que en el caso II. Este hecho se debe a que cuando existen una gran diferencia entre la potencia recibida por las estaciones base, el uso de Waterfilling intenta adaptarse a esta situación, mientras que utilizando valores de potencia iguales en los transmisores la asignación de potencia es mucho más rígida. Si los terminales UE1 y UE2 siempre estuviesen situados en la posición (0,0), la potencia recibida con origen

en los dos puntos de acceso sería exactamente igual, y no habría diferencia entre utilizar Waterfilling o potencias uniformes.

Respecto a los resultados obtenidos comprobamos como la aplicación de coordinación nos ofrece mejores prestaciones en nuestro sistema.

En el caso I llegamos al percentil cincuentavo con una tasa binaria de 900 Kbps mediante distribución uniforme de potencia y de 1200 Kbps aplicando la técnica de Waterfilling. Actualmente la velocidad máxima ofrecida por los operadores para servicios 3G se encuentra alrededor de los 3.6 Mbps, en un escenario tan pesimista como el desarrollado en el caso I, tendríamos que llegar al percentil 80 para conseguir dichas tasas binarias.

Para caso II comprobamos como los servicios ofrecidos mejoran considerablemente. Con solo llegar al percentil sexto, la media de tasa binaria de los usuarios será de 1 Mbps, y al 25 para conseguir una velocidad HSPA de 3.6 Mbps. Como era de esperar, es en este caso donde conseguimos mejores resultados al aplicar coordinación entre estaciones base, de modo que incluso en un entorno de interferencias se pueden conseguir velocidad equiparables a las ofrecidas por los servicios WiFi clásicos.

6.4.2. Escenario B. Dos puntos de acceso con dos terminales dentro de cobertura

En este caso seguiremos utilizando el esquema del escenario anterior, en el que existen dos puntos de acceso vecinos y un terminal correspondiente al FAP2 que realiza una visita al usuario de FAP1. Sin embargo ahora añadiremos el efecto interferente de una macro/micro celda situada en la posición (-500, -500). El esquema de nuestro escenario será:

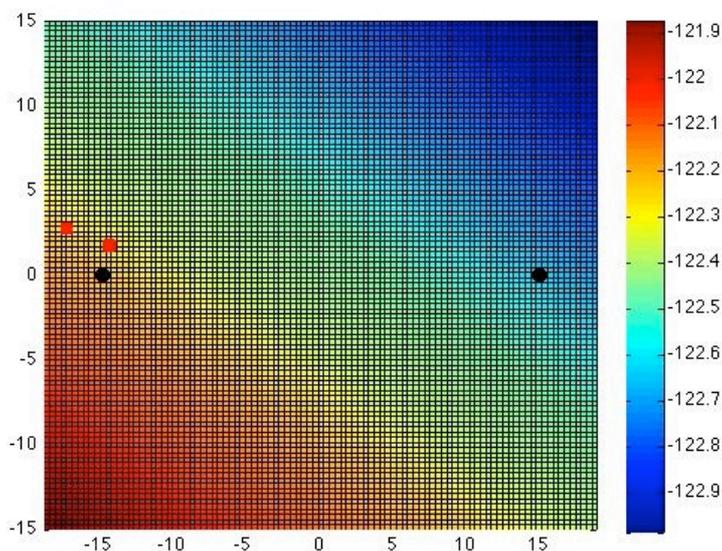


Figura 6.5. CBST Escenario B

En la Figura 6.5 podemos observar como la posición de los puntos de acceso femtocelda FAP1 y FAP2 corresponde con la del escenario anterior. En la misma figura hemos añadido un mapa especificando el nivel de interferencia en cada punto. A lo largo de esta sección vamos a realizar varias simulaciones suponiendo que el origen de la interferencia es una macro o una microcelda operando en el mismo canal. Con el objetivo de mostrar un parámetro común a ambos casos la escala de colores corresponde a las pérdidas sufridas en el trayecto desde la antena al punto en cuestión. A fin de simplificar el

calculo de dichas pérdidas, utilizamos un modelo de propagación log-normal caracterizado para escenarios residenciales. Los parámetros de la macro y la microcelda se encuentran detallados en la Tabla 6.1:

Parámetro	Macrocelda	Microcelda
Potencia transmitida	43 dBm	38 dBm
Ganancia	17 dBi	3 dBi
Pérdidas en conectores	3 dB	1 dB

Tabla 6.1: Parámetros macro/micro celda

Al igual que en el escenario A comenzaremos estudiando los servicios de datos ofrecidos cuando se prescinde de utilizar métodos de coordinación entre estaciones base. Una vez establecida la necesidad de una solución cuando nos encontramos en casos extremos, en los que el nivel de interferencia es máximo, realizaremos varias simulaciones utilizando las técnicas desarrolladas en la referencia [37]. En este sentido llevamos a cabo un estudio en el que a pesar de la coordinación entre estaciones base y la utilización de un esquema de forzamiento de cero existe interferencia cocanal con origen en una macrocelda. Sin embargo, la suposición de una antena macro Nodo B muy cercana resulta bastante pesimista, ya que se espera la utilización de sistemas femtocelda sea dentro de entornos urbanos, de modo que también añadiremos una simulación suponiendo que la interferencia proviene de una antena microcelda.

En la Figura 6.6 podemos observar los resultados obtenidos cuando no existe ninguna técnica de gestión de interferencias. Como sucedía en el escenario A, solo mostramos la tasa binaria del usuario UE2, el cual es el principal afectado en nuestro escenario de simulación. Respecto al usuario UE1 su capacidad siempre se encontrará en torno a las decenas de Mbps.

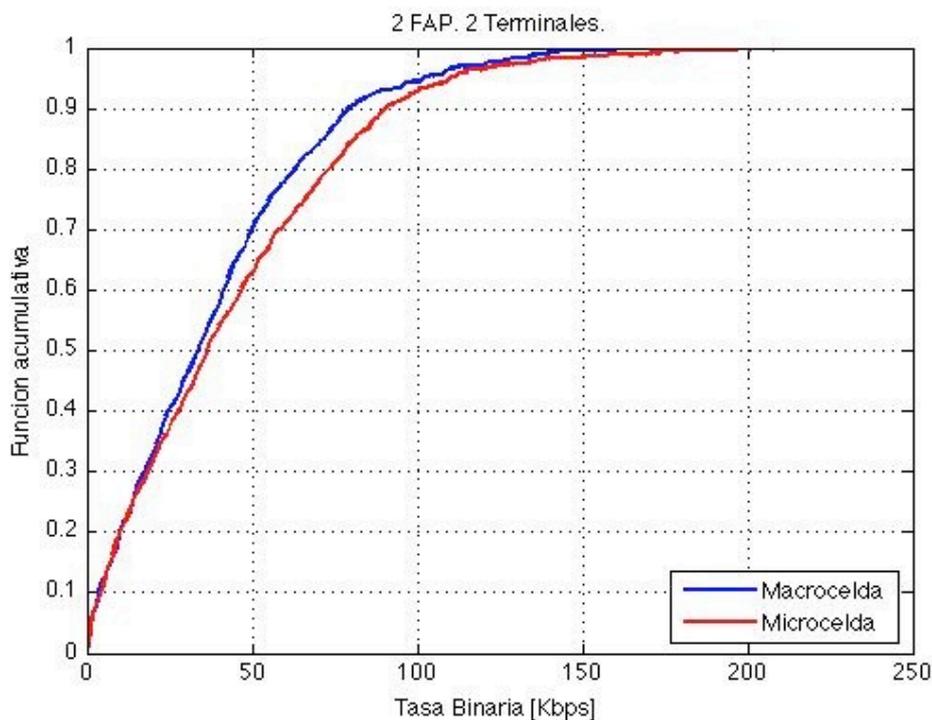
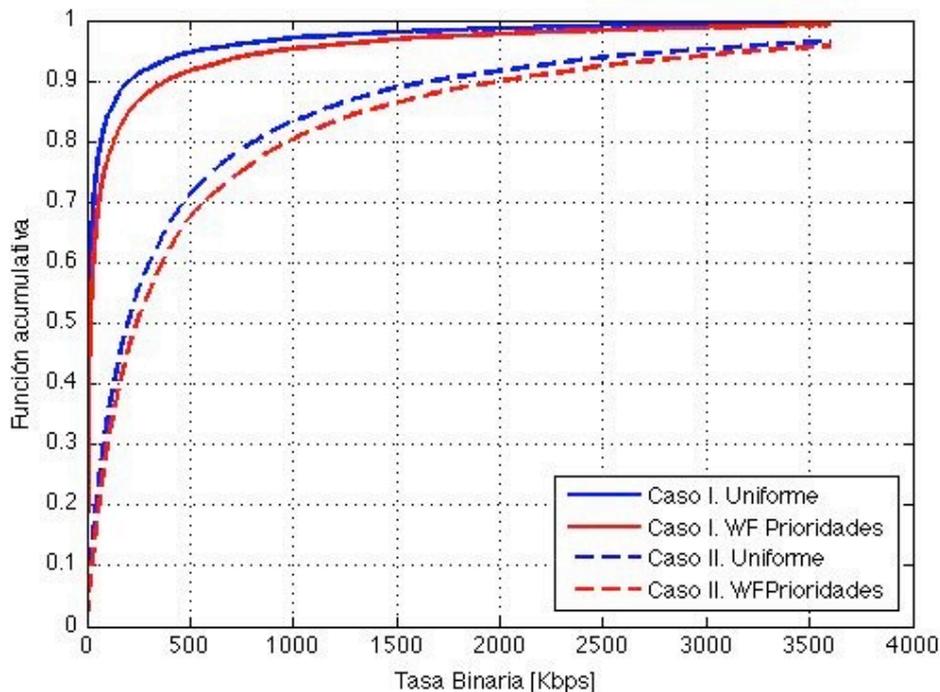


Figura 6.6: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado

Lo primero que no llama la atención es la escasa diferencia entre las dos curvas, con ello podemos concluir que el principal motivo del bajo rendimiento de nuestro sistema son las interferencias generadas por el propio sistema femtocelda. Respecto a los resultados numéricos, estos son muy parecidos, aunque ligeramente inferiores, a los obtenidos en la Figura 6.3, alrededor de 40 Kbps para el percentil 40 y menos de 100 Kbps a partir del noventa. Por lo tanto resulta obvio la necesidad de utilizar algún tipo de estrategia para reducir los efectos nocivos de las interferencias en este tipo de entornos.

En las Figura 6.7 y 6.8 mostramos las curvas resultantes de la simulación de nuestro escenario. Hemos realizado dos suposiciones, una de ellas (caso I) muy extrema, en la que los terminales se encuentran a menos de tres metros del punto FAP2 y otra con condiciones más relajadas (caso II), suponiendo que los terminales pueden encontrarse aleatoriamente en cualquier punto de nuestro escenario. Destacar que hemos limitado la tasa binaria a 3,6 Mbps a fin de poder visualizar los resultados de manera óptima.

**Figura 6.7: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado bajo macrocelda**

Utilizando técnicas ZF conseguimos eliminar la interferencia entre puntos de acceso femtocelda, de modo que la única potencia nociva existente, además del ruido será la originada por la macrocelda. Comparando las curvas obtenidas con las obtenidas en la Figura 6.4 comprobamos como se ha producido un deterioro significativo en los servicios ofrecidos. Luego en el caso de que exista una antena macro Nodo B muy cercana a nuestro escenario trabajando en la misma banda de frecuencia que las femtoceldas, éste será el principal motivo del bajo rendimiento del servicio de datos ofrecido.

En el caso I los resultados son bastante malos, es necesario llegar hasta el percentil 75 para obtener una tasa binaria en torno a 100 Kbps, y solo a partir del percentil noventa se consiguen velocidades superiores a los 500 Kbps. Comparando con la Figura 6.6

concluiríamos que la utilización de coordinación entre estaciones base no nos aporta un gran salto cualitativo en los servicios ofrecidos.

Para el caso II los resultados mejoran ligeramente, ahora los usuarios se encuentran repartidos a lo largo de todo el escenario, de modo que aumenta la efectividad de utilizar varios puntos de acceso femtocelda. Sin embargo los resultados están muy lejos de los conseguidos en el primer escenario, para el percentil 50 la velocidad de transmisión se encuentra en torno a los 200 Mbps, mientras que cuando no existía interferencia macrocelda la tasa binaria era de 1 Mbps para dicho percentil

Acabamos de comprobar como la existencia de una macrocelda cercana a nuestro sistema femtocelda puede afectar gravemente a las prestaciones. Sin embargo esta suposición resulta muy extrema, y sería casi imposible que pudiese suceder en la vida real por varias razones. La primera de ellas se basa en la consideración de que las femtoceldas están orientadas a entornos urbanos de alta densidad, en donde es muy difícil encontrar antenas macro Nodo B con tanta potencia de transmisión. La segunda consiste en la necesidad de implantar un sistema femtocelda, es decir, en una localización con una cobertura tan buena no existiría necesidad de implantar este tipo de sistema.

Teniendo en cuenta estos factores, plantearemos un escenario más realista en el que la interferencia proviene de una antena microcelda, utilizada típicamente en escenarios urbanos con alta densidad de terminales móviles. En la Figura 6.8 mostramos los resultados obtenidos.

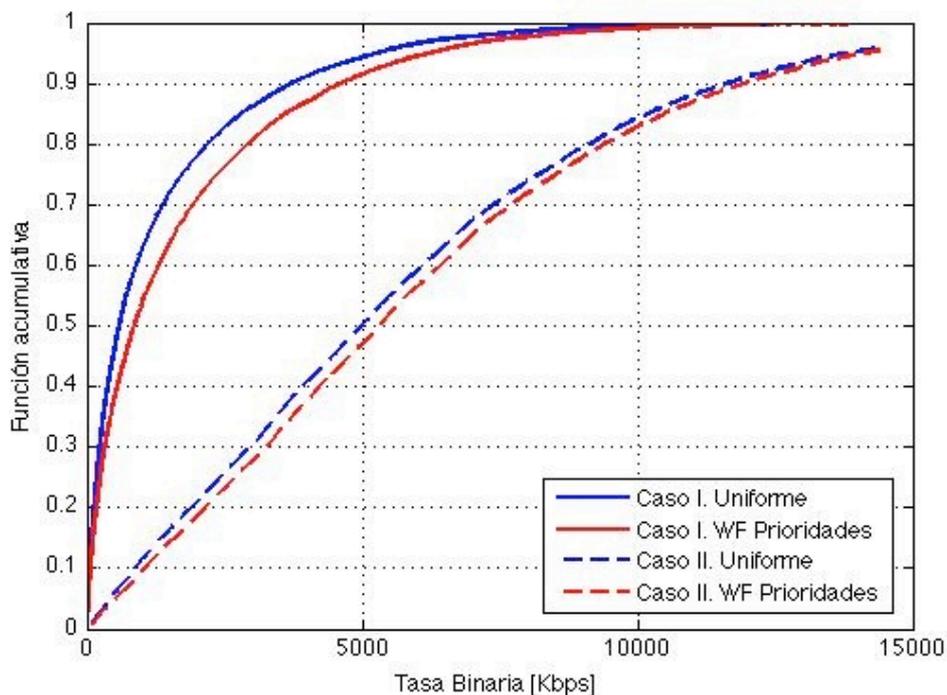


Figura 6.8: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado bajo microcelda

En este caso los servicios ofrecidos mejoran notablemente respecto al caso de interferencia macrocelda y aunque peores, se asemejan más a los obtenidos en la Figura 6.4. También podemos observar como ha aumentado la diferencia entre utilizar un esquema uniforme a utilizar Waterfilling.

Cuando los usuarios se encuentran muy cercanos al punto de acceso FAP2 (Caso I), las velocidades para el percentil 50 son de 600 Kbps utilizando distribución uniforme y de

850 Kbps con Waterfilling. Teniendo en cuenta todas las dificultades de este caso concreto, usuarios agrupados en torno a un mismo punto de acceso, interferencia cocanal de un microcelda... podemos afirmar que los resultados obtenidos son muy buenos y permitirían realizar una transferencia de datos con los requerimientos exigidos actualmente.

Respecto al caso II, los usuarios se encuentran repartidos a lo largo de todo el escenario, de modo que como ya hemos especificado, la eficacia del esquema coordinado aumenta considerablemente, ya sea con distribución uniforme o utilizando Waterfilling. Con tan solo llegar al percentil veinteavo la tasa binaria sería superior a 2 Mbps por segundo.

6.4.3. Escenario C. 15 puntos de acceso con distintas cantidades de terminales

Tras realizar el estudio del caso en el que únicamente hay dos puntos de acceso y dos terminales, buscamos aumentar la complejidad de nuestro escenario simulando un conjunto más grande de viviendas, concretamente existirán 15 puntos de acceso separados una distancia de 30 metros en horizontal y 60 en vertical. El esquema de nuestro escenario sería el mostrado en la Figura 6.9, podemos observar la disposición de los puntos de acceso y la distribución aleatoria de los terminales femtocelda.

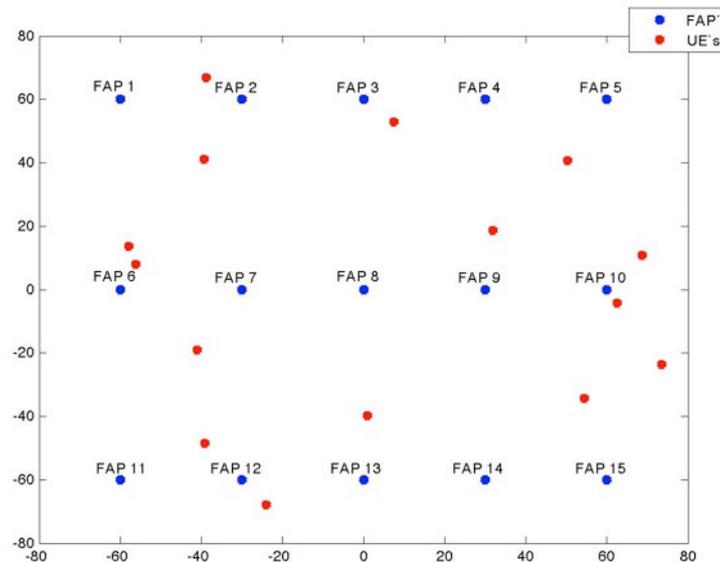


Figura 6.9: CBST Escenario C

Siguiendo el procedimiento de los escenarios anteriores, comenzaremos realizando una simulación de Monte Carlo de la tasa binaria ofrecida por nuestro sistema, cuando no utilizamos un esquema de coordinación. En este caso, cada punto de acceso debe competir en un entorno de interferencia contra el resto de sus vecinos a fin de ofrecer servicio a sus terminales correspondientes. A la hora de realizar la simulación del escenario, únicamente hemos estudiado el comportamiento de los terminales conectados al punto FAP8, ya que al ser el más céntrico será el más afectado por las interferencias generadas en su entorno. Por ejemplo, en la Figura 6.10 si los terminales se sitúan alrededor de la zona señalada en color verde, el punto FAP8 debe competir principalmente con los puntos de acceso FAP6, FAP7, FAP1 y FAP2 ordenados de mayor interferencia a menor.

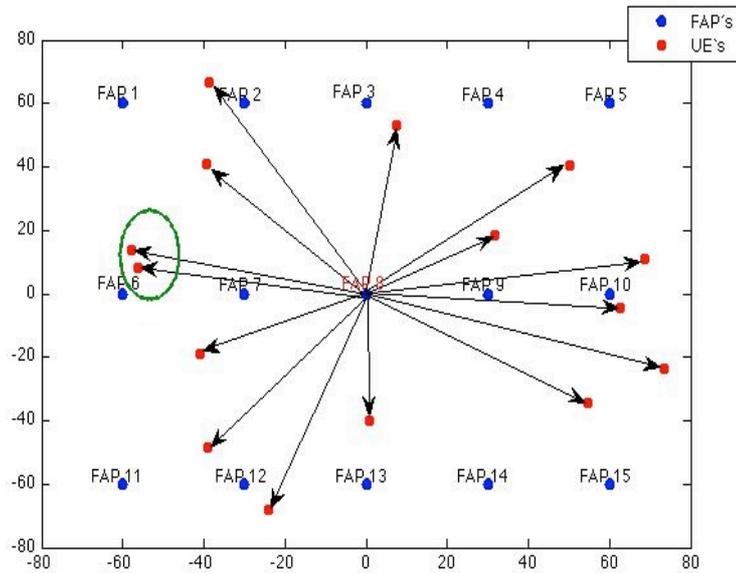


Figura 6.10: CBST Escenario C (FAP competitivas)

Otro aspecto a tener en cuenta es la banda de frecuencia en la que trabaja cada femtocelda. Cuando solo teníamos dos puntos de acceso suponíamos que ambas trabajaban en el mismo canal, de modo que la interferencia entre ambas era máxima. Sin embargo esta suposición resulta muy exagerada en el caso de tener quince puntos de acceso, por lo tanto a la hora de realizar nuestra simulación hemos calculado la tasa binaria para varios casos, en los que el 100%, 50%, 33% y 25% de las femtoceldas trabajan en la misma frecuencia central.

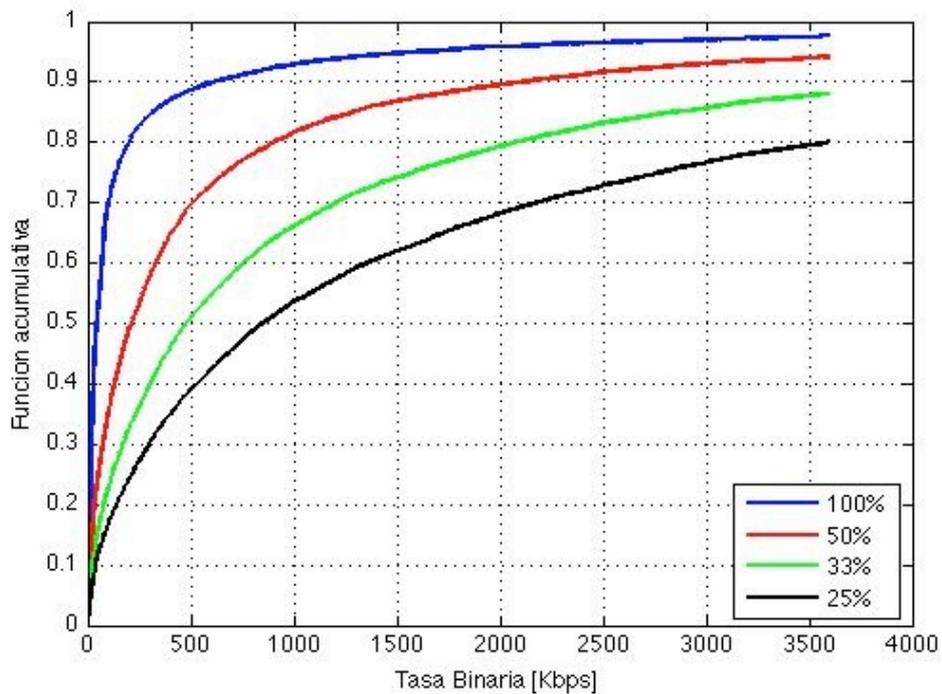


Figura 6.11: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado

En la Figura 6.11, podemos comprobar como en el caso en el que todas las femtoceldas utilicen la misma frecuencia los resultados son realmente negativos, en torno al percentil 50 obtendríamos una velocidad de 45 Kbps y necesitaríamos llegar hasta el 90 para que el sistema comience a ofrecer una tasa binaria razonable de 600 Kbps. Los resultados mejoran considerablemente en los siguientes casos, sobre todo cuando la reutilización de frecuencias permite que solo el 33% o el 25% de los puntos de acceso operen en la misma banda de trabajo. En estas situaciones se alcanzan velocidades superiores a los 500 Kbps para la mitad de los usuarios, y superiores a 1 Mbps a partir del percentil 65 de los resultados obtenidos.

Otro aspecto a tener en cuenta, es la considerable mejora que se produce al pasar del caso en el que la interferencia cocanal se produce por el 33% al 25% de las femtocelda. Sin embargo los resultados obtenidos están muy lejos de los 14,4 Mbps que nos pueden llegar a ofrecer la tecnología femtocelda como máximo. Con el objetivo de mejorar las prestaciones, el siguiente paso de nuestro estudio es la aplicación de los esquemas de coordinación de estaciones base desarrollados en la referencia [37].

La principal ventaja de utilizar un esquema de coordinación entre puntos de acceso es la eliminación de interferencias entre femtoceldas. Sin embargo ahora la complejidad del sistema es mucho mayor y la potencia transmitida por cada antena hacia un terminal en concreto es menor. De este modo, todas las antenas de nuestro sistema colaboran en la transmisión de información hacia el equipo usuario independientemente de la posición en la que se encuentre. Así, la situación donde mejor calidad de señal existirá en nuestro escenario es el punto central, mientras que la peor cobertura se dará en las esquinas.

La localización de los terminales será crucial para el rendimiento del sistema. Para poder reflejar este hecho, hemos tenido en cuenta distintas suposiciones a la hora de realizar la simulación de nuestro escenario:

- Caso I. Todos los terminales se encuentran distribuidos aleatoriamente a lo largo de todo nuestro escenario.
- Caso II. Los terminales están concentrados en el centro del escenario, entre las posiciones $x = (-40, 40)$ e $y = (-40, 40)$.
- Caso III. Los terminales se encuentran concentrados en una esquina del escenario, en torno a las posiciones $x = (-20, 80)$ e $y = (-20, 80)$.

Otro parámetro a tener en consideración, es el número de usuarios activos en el escenario. En el caso de utilizar 15 usuarios la carga del sistema será máxima, sin embargo cuando este número es inferior, las prestaciones ofrecidas mejoran considerablemente. En las Figuras 6.12 y 6.13 podemos ver los resultados obtenidos para los diversos casos en los que existen 15 y 12 usuarios activos respectivamente.

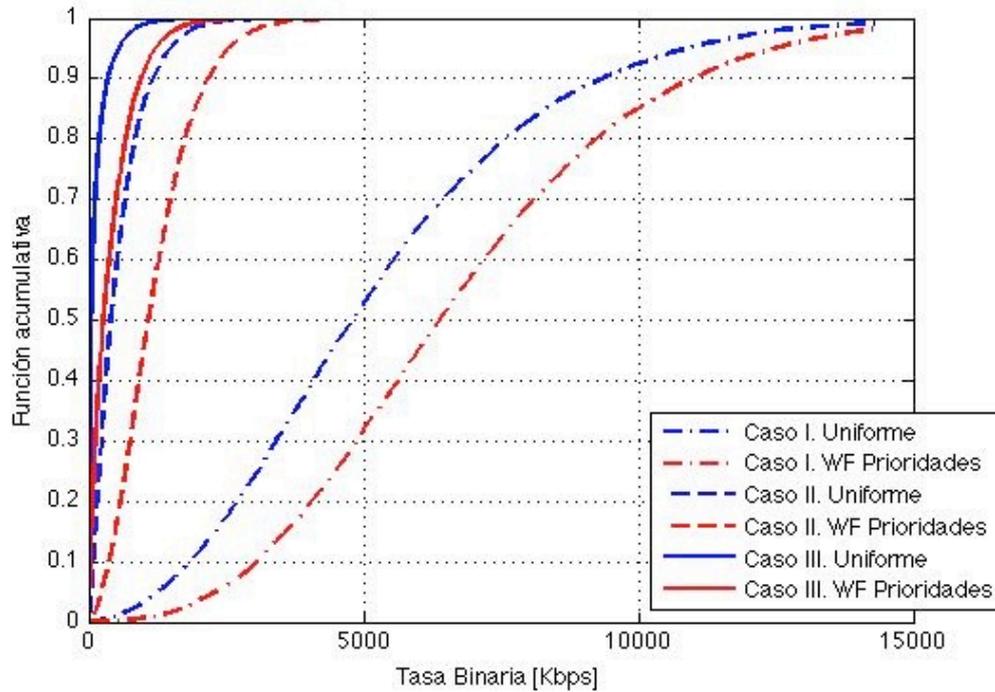


Figura 6.12: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (15 usuarios)

Observando la Figura 6.12 comprobamos la importancia de la posición de los usuarios. Si todos los éstos se encuentran distribuidos uniformemente en el escenario los resultados son muy competitivos. Utilizando un esquema de Waterfilling, el 70% de los usuarios puede disponer de una tasa binaria superior a 5 Mbps, mientras que este porcentaje se reduce al 50% si todos los puntos de acceso transmiten con el mismo nivel de potencia. Sin embargo las velocidades disponibles son inferiores en los casos II y III, y la utilización de Waterfilling comienza a ser necesaria en contra de la distribución uniforme de potencias. Por ejemplo, cuando los usuarios se sitúan entorno al centro del escenario, necesitaríamos llegar hasta el percentil 50 para conseguir una tasa binaria de 1 Mbps utilizando prioridades, mientras que cuando la potencia transmitida es igual en todas las antenas necesitaríamos ascender hasta el 85 para ofrecer una velocidad similar.

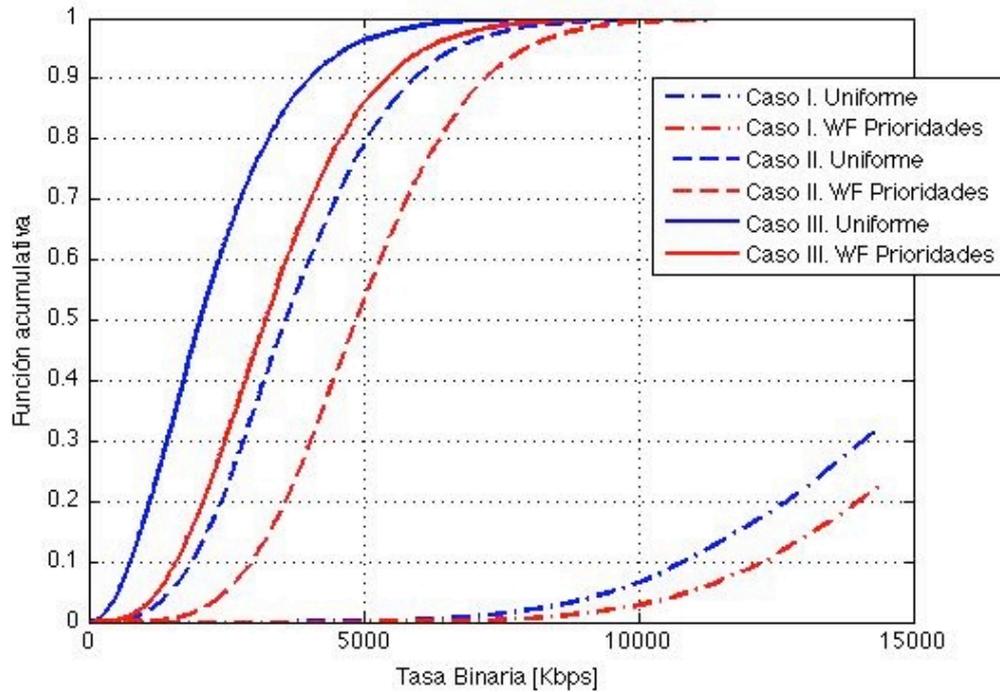


Figura 6.13: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (12 usuarios)

Comprobamos como reduciendo el número de terminales activos a doce, los resultados mejoran enormemente. Respecto al caso I la mayoría de los usuarios, en torno al 80%, podrían acceder al servicios de datos con la máxima tasa binaria, situada en 14,4 Mbps. Sin embargo, los mejores cambios se producen en los caso II y III, utilizando Waterfilling el 20% de los usuarios disfrutaría de una velocidad superior a los 3,6 Mbps y 2 Mbps respectivamente.

6.4.4. Escenario D. 15 puntos de acceso dentro de cobertura microcelda

Finalmente realizaremos una simulación en la que al igual que en el caso anterior existen 15 puntos de acceso, con la salvedad de que ahora existirán interferencias originadas en un microcelda situada en la posición (-500,500). En la Figura 6.14 podemos observar una representación del esquema utilizado y el nivel de interferencia en cada punto del escenario.

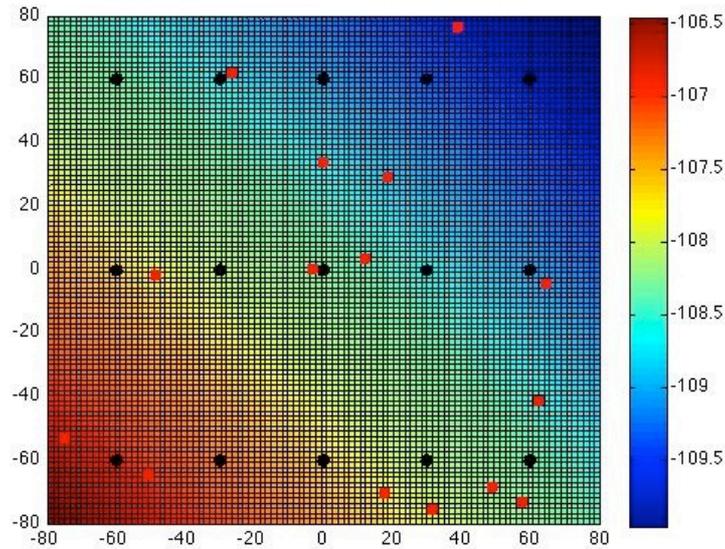


Figura 6.14: CBST Escenario D

Comenzaremos realizando una simulación para el caso en el que no exista coordinación entre los femtoceldas. Al igual que en apartado anterior supondremos distintos casos de interferencia cocanal, concretamente calcularemos la función acumulativa de la tasa binaria ofrecida cuando el número de antenas trabajando en la misma banda de frecuencia es del 100%, 50%, 33% y 25% del total de nuestro escenario. Mostramos los resultados obtenidos en la Figura 6.15.

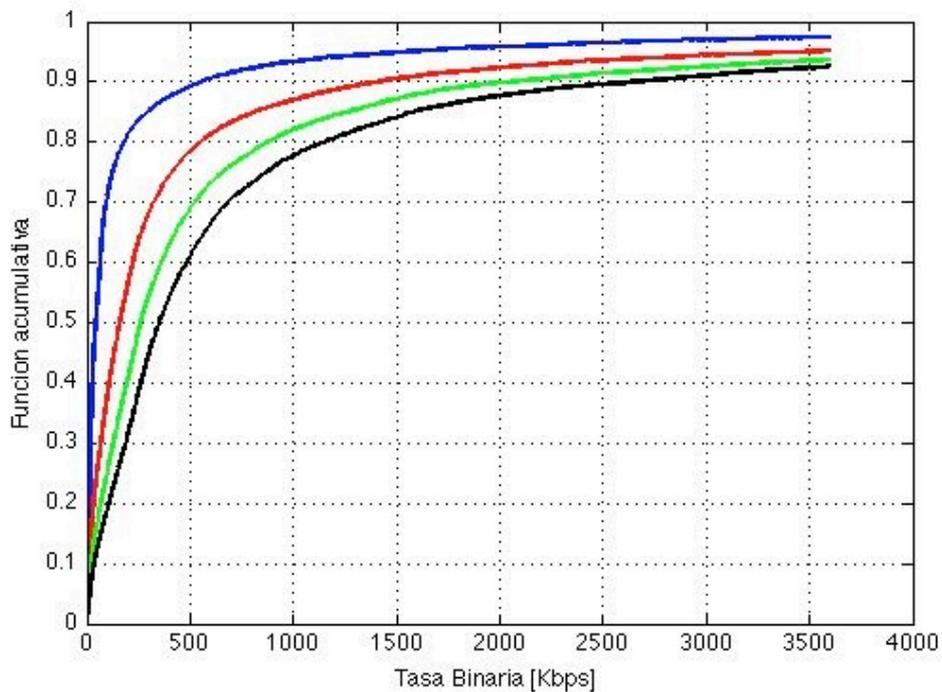


Figura 6.15: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema no coordinado

Lo primero que nos llama la atención es el descenso en la tasa binaria ofrecida en comparación con el caso en el que no existe interferencia microcelda (Figura 6.11). Si todas las femtoceldas transmiten en la misma frecuencia, solo el 25% de los usuarios podrá

acceder a velocidades superiores a 128 Kbps. Otro aspecto a tener en cuenta, es la mejora que se produce al existir menos femtoceldas interferentes, ahora el salto de utilizar la misma frecuencia para el 50% al 25% de las celdas, supone una mejoría de solo 200 Kbps en el percentil 50, mientras que en el escenario C este mismo salto era de 600 Kbps. Por lo tanto podemos concluir que en este caso la interferencia generada por la antena microcelda compite con la emitida por todos los puntos de acceso femtocelda, reduciendo considerablemente las prestaciones del sistema.

Tras comprobar los resultados obtenidos en la Figura 6.15 decidimos aplicar un esquema de coordinación entre los puntos de acceso de nuestro sistema. Tal y como sucedía en el escenario C, tendremos en cuenta diferentes distribuciones de los usuarios a fin de comprobar el comportamiento de nuestra red coordinada de antenas en función de la localización de los terminales. Estos casos son los mismos que los detallados en el escenario anterior, de modo que no consideramos necesario volver a detallarlos en este apartado.

El segundo parámetro que vamos a modificar a la hora de realizar las simulaciones es el número de usuarios activos dentro del escenario. Realizamos el cálculo de la tasa binaria cuando existen 15 y 12 usuarios, sin embargo, tras comprobar los resultados obtenidos decidimos añadir una nueva gráfica en la que se estudia el caso en el que únicamente existen 8 usuarios activos. A continuación mostramos los resultados obtenidos.

En la Figura 6.16 observamos la tasa binaria cuando existen 15 usuarios dentro de la región estudiada:

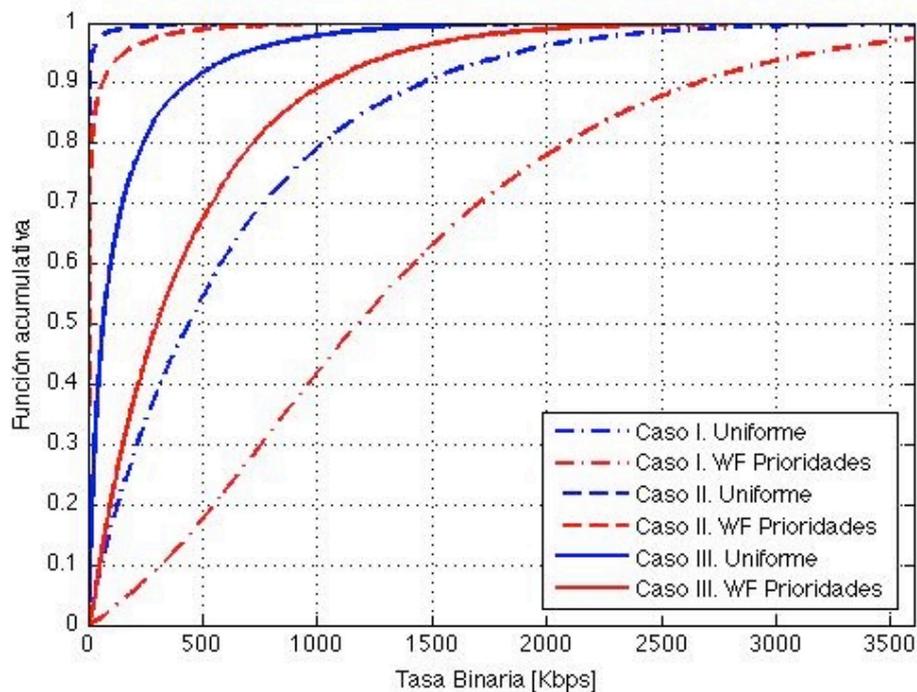


Figura 6.16: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (15 usuarios)

Respecto a los resultados obtenidos, destacar la diferencia entre utilizar un esquema de Waterfilling frente al uniforme en el caso I. Si todos los usuarios se encuentran distribuidos de manera aleatoria a lo largo de todo el escenario, más del 60% de estos podrán acceder a una tasa binaria de 1 Mbps en el caso de utilizar Waterfilling, mientras que este porcentaje se reduce al 20% cuando todas las femtoceldas utilizan la misma potencia de transmisión.

Otro aspecto que nos llama la atención, consiste en que ahora obtiene mejores tasas binarias el caso III que el caso II. La diferencia se debe a que los usuarios del caso III se encuentran localizados en la esquina superior derecha del escenario, donde las pérdidas de propagación son mayores. Este hecho nos puede dar una visión de cuanto afecta la aparición de interferencias generadas por una microcelda en nuestro sistema.

Finalmente las tasas conseguidas para los casos II y III no superan los 200 Kbps, las cuales resultan muy pequeñas teniendo en cuenta las pretensiones de la tecnología femtocelda. De modo que se cumple lo que ya dedujimos en el escenario C, la coordinación entre estaciones base resulta muy beneficiosa cuando los usuarios se distribuyen uniformemente a lo largo de todo el escenario, pero pierde eficacia cuando éstos se congregan en una zona concreta.

Teniendo en cuenta las tasas binarias obtenidas, y con el objetivo de mejorar los resultados, especialmente en los casos II y III, el siguiente paso ha sido realizar el mismo tipo de simulación cuando el número de usuarios activos se reduce a 12. Podemos ver los resultados obtenidos en la Figura 6.17.

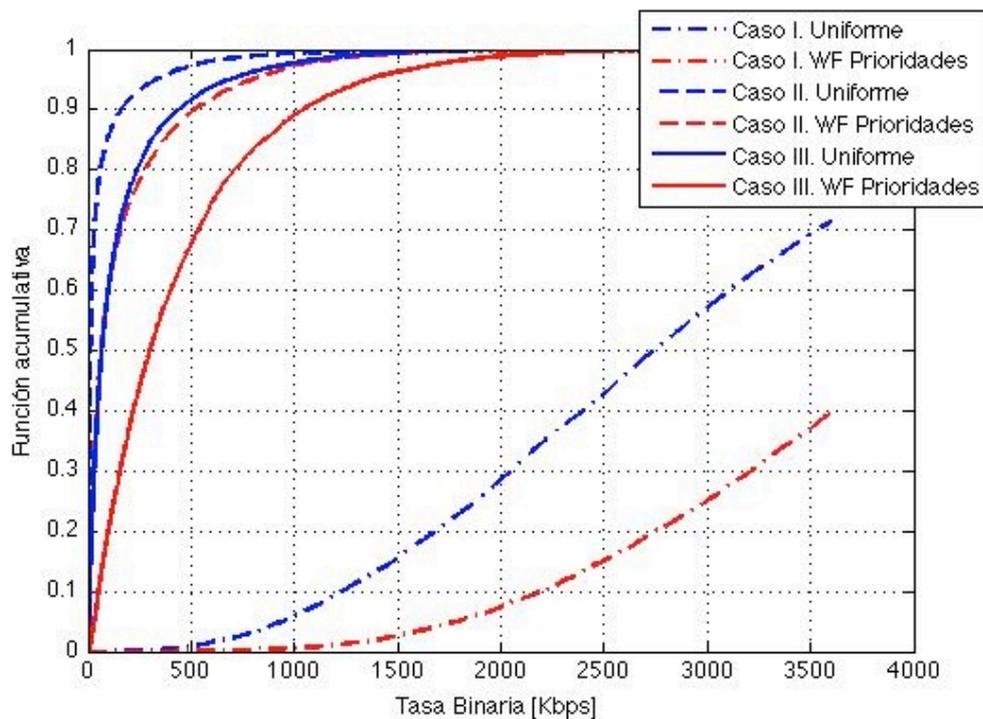


Figura 6.17: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (12 usuarios)

Comprobamos como para el caso I los resultados son realmente positivos, utilizando un esquema de prioridades más del 60% de los terminales pueden acceder a una velocidad superior a 3,6 Mbps. Sin embargo, cuando los usuarios se encuentran dentro de una región más pequeña los resultados son muy parecidos a los obtenidos en la Figura 6.16. Por un lado en el Caso III se ha producido una leve mejora, pero las tasas binarias disponibles siguen siendo insuficientes para cumplir los objetivos buscados al instalar una femtocelda. Sin embargo en el caso II las curvas son prácticamente iguales, esto se debe a que a pesar de reducir el número de usuarios, la red formada por los puntos de acceso todavía es incapaz de contrarrestar el efecto de la interferencia microcelda.

Tras comprobar como utilizando 12 usuarios los resultados siguen siendo desfavorables para los casos II y III, hemos realizado un estudio con el objetivo de encontrar un número de usuarios óptimo en nuestro escenario. Tras realizar varias simulaciones hemos fijado dicha cantidad en 8 usuarios activos, en la Figura 6.18 podemos visualizar los resultados obtenidos:

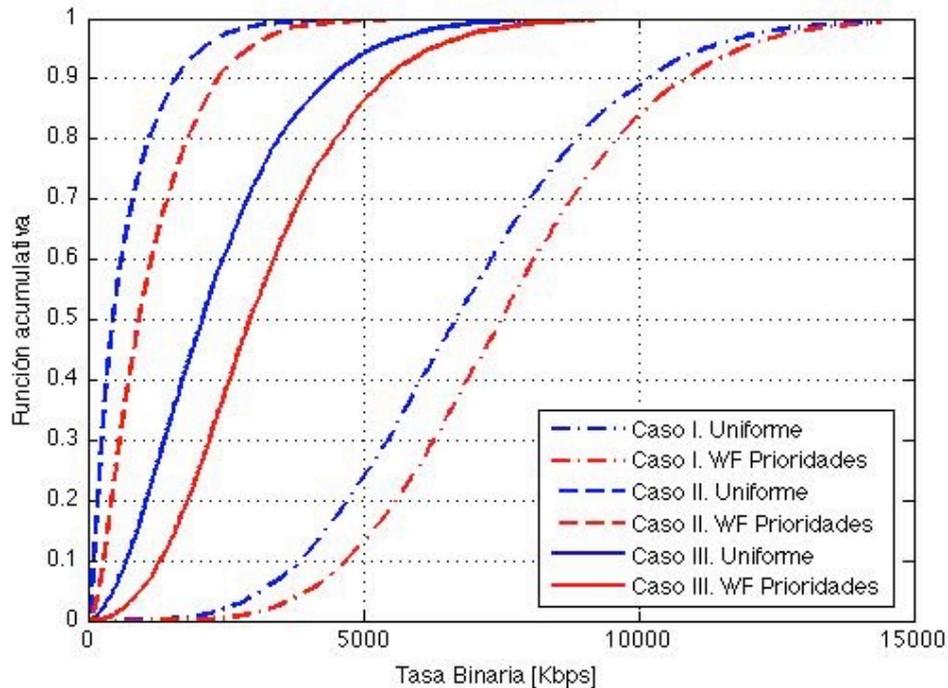


Figura 6.18: CDF de la tasa binaria disponible en un esquema coordinado (8 usuarios)

En este caso, aplicando coordinación entre los puntos de acceso somos capaces de contrarrestar la interferencia generada por la microcelda. Especialmente llamativo resulta el cambio producido en el caso III, en el que en torno al percentil veinteavo la tasa binaria ya se encuentra en valores superiores a 1 Mbps y más de la mitad de los usuarios pueden acceder a una velocidad de 3 Mbps utilizando un esquema de Waterfilling. Para el caso II los resultados no son tan favorables, sin embargo también se produce una mejora considerable, casi la totalidad de los terminales tienen asegurada una velocidad superior a los 128 Kbps, y alrededor de la mitad de ellos podrán acceder a tasas por encima de 1 Mbps dentro de un entorno realmente pesimista. Finalmente, cuando todos los usuarios se encuentran distribuidos uniformemente los resultados son muy buenos, asegurando velocidades superiores a los 5 Mbps para la gran mayoría de terminales FUE.

6.5. Conclusiones

Tras haber realizado un estudio conciso de los cuatro escenarios tratados, podemos llegar a las siguientes conclusiones.

Existen casos concretos como los tratados en las Figuras 6.3 y 6.6 en lo que resulta necesario aplicar técnicas de gestión de interferencias a fin de ofrecer tasas binarias aceptables para el consumidor.

En los casos descritos en el punto anterior, la aplicación de forzamiento de cero en conjunto con la coordinación entre estaciones base, permite solventar el problema de las bajas velocidades ofrecidas cuando la interferencia entre femtoceldas es máxima. Dichas tasas binarias llegan a aumentar en un orden de magnitud en comparación con la solución basada en femtoceldas competitivas.

A lo largo del estudio hemos comprobado como la existencia de una antena macrocelda afecta enormemente a los escenarios de coordinación planteados. En este punto cabe destacar que la aplicación de sistemas femtoceldas está orientada a entornos urbanos, en los que es muy improbable encontrarnos con este nivel de señal procedente de una antena macro Nodo B en la misma banda de frecuencia.

En las Figuras 6.4 y 6.8 podemos observar la enorme diferencia que existe entre el caso en el que los usuarios se encuentran distribuidos a lo largo de todo el escenario y en el que éstos están concentrados en torno a un punto de acceso. Por lo tanto podemos concluir que la efectividad del esquema basado en coordinación aumenta cuando los usuarios se encuentran a medio camino entre las dos antenas.

El esquema propuesto nos ofrece dos posibilidades de distribución de potencia, uniforme y Waterfilling. A lo largo de este capítulo hemos comprobado como la segunda opción siempre ofrece mejores resultados, especialmente en los casos en los que existe una diferencia considerable entre los caminos entre terminal y estaciones base.

Durante el estudio de los escenarios C y D, hemos comprobado las bajas velocidades ofrecidas cuando no se aplica ninguna técnica de gestión de interferencias y todas las femtoceldas transmiten en la misma banda de frecuencia. Destacar que esta situación es exageradamente pesimista, en las Figuras 6.11 y 6.15 observamos como cuando existen varias frecuencias trabajando en el mismo escenario, los resultados mejoran enormemente conforme menos interferencia cocanal existe.

Cuando existen un conjunto de muchas femtoceldas trabajando de manera cooperativa, los resultados son muy buenos siempre que los usuarios se encuentren distribuidos uniformemente. El principal problema que surge al utilizar muchas femtoceldas coordinadas es la posibilidad de concentración de usuarios en un punto determinado, en estos casos la calidad del servicio ofrecido desciende notablemente. Este tipo de configuración resulta muy útil en edificios grandes tales como centros comerciales, hoteles, universidades... sin embargo sería necesario realizar un pequeño estudio de la concentración de usuarios, a fin de reforzar esas zonas con un número mayor de antenas.

Destacar la importancia del número de usuarios activos en los escenarios C y D. Las prestaciones del sistema mejoran en gran manera conforme desciende este parámetro, de modo que cuando existen 15 usuarios, las tasas binarias ofrecidas son relativamente bajas, especialmente cuando existen congregación de usuarios en una zona. Sin embargo con tan solo reducir este número a 12 en el escenario C y a 8 en el escenario D los servicios ofrecidos se muestran competitivos en el mercado actual.

Finamente podemos concluir que la utilización de esquemas de coordinación entre estaciones base son una buena solución para asegurar tasa binarias elevadas en escenarios urbanos, especialmente en casos extremos como los tratados a lo largo de este estudio. Por otro lado, desde el punto de vista del operador permite utilizar un factor de reutilización de frecuencias muy elevado entre sistemas femtocelda. Llegados a este punto, y tras comprobar el impacto de una macro/micro celda trabajando en la misma frecuencia que un grupo de femtoceldas, sería interesante plantear dividir el espectro disponible en entornos urbanos entre femtoceldas y resto de dispositivos. De este modo se podrían eliminar las interferencias entre estos dos tipos de celdas y nos encontraríamos siempre en los escenarios A y C.

Capítulo 7

Conclusiones Finales

Conclusiones Finales

Tras realizar un estudio completo de los sistemas femtoceldas, centrándonos en la gestión de interferencias, hemos podido llegar a las siguientes conclusiones:

En cuanto a los diferentes escenarios de simulación planteados en el quinto capítulo, podemos asegurar la existencia de cierta armonía entre los sistemas macro y femtocelda. En los escenarios G, H, I y J, hemos podido comprobar cómo en el caso de que las interferencias provengan de un canal adyacente, el impacto en los servicios prestados a los usuarios es mínimo. Sin embargo, cuando esta interferencia tiene propiedades cocanal, escenarios A, B, C y D, puede llegar a ser un factor capaz de limitar la cobertura y capacidad ofrecida a los usuarios de ambas redes.

Por un lado las femtoceldas generan lo que durante este proyecto hemos denominado “zonas muertas” en torno a su punto de acceso. Este fenómeno comienza a ser crítico conforme el radio de dicha zona es superior a cinco metros, ya que puede impedir que usuarios situados fuera de la vivienda accedan a servicios macrocelda. La solución más simple pasa por reducir la potencia de transmisión del punto FAP, lo que conlleva un descenso de la cobertura femtocelda, luego en estos casos debe existir un compromiso entre el radio de la “zona muerta” y la femtozona. Otra posibilidad es redirigir al usuario macrocelda hacia otra frecuencia UMTS, de este modo podríamos asegurar que nos encontramos en alguno de los escenarios G, H, I y J, donde ya hemos especificado que la repercusión de la interferencia en el canal adyacente es mínima.

Desde el punto de vista de la estación base femtocelda, tanto los usuarios MUE, como las propias antenas macro Nodo B, suponen una amenaza cuando trabajan en el mismo canal. Ambas pueden conseguir que la relación E_b/N_0 en el receptor femtocelda sea insuficiente para poder realizar servicios de voz y datos. Las herramientas de la que dispone un punto FAP en estos casos, es el control automático de ganancia (CAG), es decir, puede reducir la ganancia de su receptor, de modo que el nivel de interferencias disminuya. Sin embargo, tal y como sucedía anteriormente, la cobertura de la femtocelda se vería afectada, siendo la posibilidad de realizar un cambio de frecuencia la mejor solución.

Tras analizar los dos casos anteriores, hemos comprobado cómo la asignación de frecuencias tiene un papel fundamental cuando los dos tipos de red interfieren entre si. Una propuesta simple sería dividir el espectro asignado a servicios móviles entre macro y femtocelda. El problema de este tipo de solución consiste en que es muy rígido, sin entrar en aspectos regulatorios, no sabríamos determinar que cantidad de espectro asignar a cada red. Por lo tanto, podemos concluir que la introducción de las femtoceldas en la red móvil tiene que venir de la mano de nuevos protocolos que permitan una gestión de frecuencias mucho mas flexible. De esta forma un punto de acceso puede ser consciente del entorno

que le rodea, y seleccionar una frecuencia portadora que optimice la calidad de los servicios ofrecidos tanto en macro como en femtoceldas.

Respecto a la gestión de una zona con gran cantidad de puntos FAP operando dentro de ella, en el escenario C hemos comprobado como dicha zona puede llegar a afectar al rendimiento de los usuarios MUE. Éstos pueden ver reducida su capacidad en un orden de magnitud si todas estas femtoceldas transmiten en el mismo canal a plena potencia. La solución vuelve a ser la misma que en los casos anteriores, una gestión correcta de frecuencias junto con cierto control de potencia por parte de los puntos de acceso femtocelda, podría evitar este tipo de contratiempos en los servicios ofrecidos por la antena macro Nodo B.

Finalmente sólo nos queda determinar el efecto de muchos usuarios FUE en las antenas macrocelda. En el escenario D hemos comprobado cómo el incremento de ruido en el receptor de la antena macro Nodo B es mínimo cuando existe un único terminal femtocelda operando a máxima potencia en el mismo canal. Sin embargo es de esperar que la cantidad de usuarios femtocelda dentro del área cubierta por la macrocelda supere las decenas, de modo que el incremento de ruido comience a ser significativo. Por lo tanto, la antena macro Nodo B debe ser consciente de la degradación de su sensibilidad, y una vez alcanzado un límite realizar gestiones para que el número de femtoceldas cocanal dentro de su cobertura no siga aumentando.

Durante los escenarios E y F estudiamos la interacción entre varios sistemas femtocelda. En una urbanización con alta densidad de puntos de acceso los usuarios pueden verse afectados por femtoceldas vecinas. Este tipo de interferencias resulta especialmente nociva cuando tratamos casos cocanal. Utilizando un sencillo esquema de reutilización de frecuencias podríamos asegurar caudales de mas de 1 Mbps a la mayoría de usuarios.

Para la situación contraria, en la que los agresores son los terminales FUE y las víctimas los puntos FAP cercanos, podemos concluir que esta interacción no supone una limitación en los servicios fermtocelda. Únicamente deberá ser tratado en escenarios con altas pérdidas de propagación como puede ser el caso de un edificio de oficinas, estos casos pueden solventarse mediante la utilización de control adaptativo de potencia.

En cuanto a la gestión de un grupo de femtoceldas, en el capítulo 6 hemos realizado una serie de simulaciones calculando la capacidad ofrecida a los terminales FUE cuando se lleva a cabo un esquema de coordinación de estaciones base. Tras observar los resultados concluimos que se trata de una técnica capaz de aumentar la tasa binaria de los usuarios, especialmente cuando la movilidad de éstos es alta. Este tipo de configuración resulta ideal para casos en los que es necesario cubrir un área relativamente extensa, como por ejemplo hoteles, edificios empresariales... ya que permite que todos los usuarios que operen dentro de ella consigan prestaciones realmente buenas, independientemente de su posición. El principal problema de esta técnica son los grupos de terminales concentrados en un área determinada. En este tipo de situación muy pocos puntos de acceso se saturan ofreciendo servicios de datos a muchos terminales, mientras que el resto se encuentran ociosos. Las posibles soluciones son la realización de un estudio de las zonas donde mayor concentración de usuarios existe y reforzarlas con mas puntos FAP, o la utilización de

sistemas MIMO utilizando puntos de acceso con varias antenas. Cualquiera de las dos soluciones acarrearán un incremento en el coste final del sistema femtocelda.

Finalmente, respecto al futuro de las femtoceldas, concluimos que se trata de una tecnología novedosa que no tardará en aparecer en nuestros hogares y empresas. El primer paso será su utilización en entornos en los que la cobertura tradicional es nula, como pueden ser locales suburbanos, naves industriales con techo metálico, o simplemente áreas geográficas en las que instalar una red macrocelda es demasiado costoso. Una vez comprobado el correcto funcionamiento de las femtoceldas, y desarrollados una serie de protocolos y técnicas que aseguren la convivencia con otras redes inalámbricas, cabe esperar el salto hacia los hogares con una gran demanda de servicios de voz y datos. Por último, el acontecimiento que determinará el éxito de las femtoceldas será el papel que éstas tengan en el salto hacia servicios de nueva generación.

Capítulo 8

Presupuesto

Presupuesto

Introducción

Durante el siguiente capítulo se llevará a cabo el detalle de los costes en material y personal derivados de la realización de este proyecto de fin de carrera. Con el fin de detallar los costes asociados, definiremos las distintas fases por las que ha pasado la elaboración del proyecto, contabilizando su duración y el “esfuerzo” dedicado en ese tiempo. Para definir “esfuerzo”, utilizaremos como medida el parámetro horas/hombre. Un día laborable habitual consta de 8 horas/hombre, y el número de días laborables al mes se estima en 22.

Finalmente las fases que podemos identificar en este proyecto son:

1. Estado del arte de los sistemas femtocelda y la gestión de interferencia en estos

Consiste en el estudio de en qué consisten y cual es del desarrollo de las redes basadas en femtoceldas. Se trata de un periodo de formación en el que se toma conciencia de la realidad y objetivos de este tipo de tecnología.

El esfuerzo empleado fue de 40 horas/hombre, divididas en 4 horas/hombre durante dos semanas laborales.

2. Análisis de las causas y consecuencias de la aparición de los sistemas femtocelda

Se trata de un análisis de las causas de la aparición de los sistemas femtocelda, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que estos conllevan tanto a operadores como clientes. En él se realiza una revisión de los diferentes procesos de estandarización, así como un desarrollo del futuro inmediato de las femtoceldas.

El esfuerzo empleado fue de treinta días, divididos bajo una media de 4 horas/hombre

3. Información de los modelos de propagación aplicables a los escenarios femtocelda

Búsqueda de los diferentes modelos de propagación y parámetros de simulación.

La duración de esta fase fue de 5 días a una media de 3 horas/hombre por día.

4. Realización de las distintas simulaciones de entornos femtocelda

Durante esta etapa hemos llevado a cabo las diferentes simulaciones que nos han permitido ofrecer una visión de la interacción entre redes macro y femto celda, así como su impacto en los servicios de voz y datos accesibles por el usuario final.

Esfuerzo de 4 meses, 88 días laborables, con un esfuerzo medio de 4 horas/hombre.

5. Información y simulación de la aplicación de esquemas coordinados en femtoceldas

Estudio de las diferentes técnicas de mitigación de interferencias, centrándonos en la coordinación entre estaciones base. Una vez establecida esta técnica como vía para minimizar el efecto de las interferencias entre femtoceldas, realizamos una serie de simulación para determinar su impacto en un escenario real.

Duración de un mes, con 32 días laborables a una media de 5 horas/hombre por día.

6. Escritura de la memoria

Redacción de la memoria respecto a los resultados finales de las simulaciones y estudios realizados.

Esfuerzo dedicado de dos meses, 44 días laborables, a una media de 5 horas/hombre.

7. Estructuración y desarrollo de la presentación del proyecto al cliente, en este caso el tribunal

Implementación de la presentación orientada al cliente. Tiempo dedicado a la realización de la misma, su revisión y realización de la presentación al tribunal.

Tres días laborables a una media de 5 horas/hombre al día.

Cálculo del presupuesto total

A. Costes de material

En esta sección se desglosan los costes correspondientes al material utilizado en la creación del proyecto.

- Ordenador portátil con un coste de adquisición de 1200€. Estimando un periodo de amortización de cuatro años, el coste asociado sería de 300€.
- Gasto en licencias de software de simulación, en este caso *Matlab*. El coste de la licencia para la versión estudiante es de 89\$, lo que al cambio corresponde a 68€.
- Los gastos en material de oficina debido a impresiones y reproducciones, incluyendo las memorias de entrega del proyecto ascienden a 280€.

Finalmente el coste en materiales asciende a 1780€.

B. Costes de personal

Los gastos en personal son relativos a los recursos humanos asociados a la realización del proyecto. De acuerdo con las fases de desarrollo, los costes del aspirante a ingeniero, Máximo Morales Céspedes, fueron de 922 horas.

De acuerdo con los baremos del Colegio de Ingenieros de Telecomunicaciones, el coste por hora para el ingeniero proyectista sería de 72€, a este valor tenemos que añadir el correspondiente 18% de acuerdo al IVA, por lo que el coste por hora sería de 85€.

Luego, el coste en personal del ingeniero proyectista es 78.370€

Se estima que un 20% del tiempo empleado se debe a las diferentes revisiones realizadas por el tutor del proyecto. Según estos datos, el coste del tutor sería de 15.674€

Finalmente el coste total en personal ascendería a 94.044€.

C. Costes totales

Finalmente, en la Tabla X procedemos a realizar el calculo de los costes totales:

Coste de material	€ 648
Coste de personal	€ 94.044
Coste total	€ 94.692

Tabla 8.1: Coste total del proyecto

Referencias

- [1] Fabio M. Chiussi, Dimitris Logothetis, Indra Widjaja, Deepak Kataria. "Femtocell Wireless Communications. Guest Editorial". *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [2] Vikram Chandrasekhar and Jeffrey G. Andrews. "Femtocell Networks: A Survey". *The University of Texas at Austin Alan Gatherer*. Junio 2008
- [3] Douglas N. Knisely, Takahito Yoshizawa, Frank Favichia. "Femtocell Wireless Communications. Standardization of Femtocells in 3GPP", *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [4] Douglas N. Knisely, Frank Favichia. "Femtocell Wireless Communications: Standardization of Femtocells in 3GPP2", *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [5] Mehmet Yavuz, Farhad Meshkati, and Sanjiv Nanda. "Femtocell Wireless Communications. Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells", *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [6] Shu-ping Yeh, Shilpa Talwar, Seong Choong Lee, Heechang Kim, "WiMAX: A Technology Update. WiMAX Femtocells: A Perspective on Network Architecture, Capacity, and Coverage", *IEEE Communications Magazine*, Octubre 2008
- [7] Aricent White Paper, "WiMAX Femtocells". Junio 2009
- [8] Ronny Yongho Kim, Jim Sam Kwak, Kamran Etemad, "Femtocell Wireless Communications. WiMAX Femtocell: Requirements, Challenges, and Solutions", *IEEE Communications Magazine*, Octubre 2008
- [9] S. Ruth "Green IT - More than a three percent solution?" *IEEE Internet Comput.*, vol. 13, no 4, Julio 2009
- [10] H. Claussen. T. W. Lester, F. Pivit, "Leveraging advances in mobile broadband technology to improve environmental sustainability", *Telecommun. J. of Australia*, vol. 59, 2009
- [11] Airvana "Femtocells: Transforming The Indoor Experiene. An Overview", 2009
- [12] George Korinthios, Elina Theodoropoulou, Niki Marouda y George Lyberopoulos, "Femtocell Wireless Communications. Early Experiences and Lessons Learned from Femtocells", *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [13] Lauren Town, Jean-Pierre Combe, "Coverage propositions for Orange Customers", *FemtoZone Mobile World Congress.*, Barcelona 2009
- [14] Rupert Baines "Femtocells Broadening applications, Broadening standars. The need for Femtocells, from 3G to 4G", *FemtoZone Mobile World Congress.*, Barcelona 2009
- [15] Willen Mulder, "MimON. The Battle for the Home", *FemtoZone Mobile World Congress.*, Barcelona 2009
- [16] Ip.access,"Femtozone services in the connected homre" *FemtoZone Mobile World Congress.*, Barcelona 2009
- [17] Natasha Tamaskar, "From 3G to 4G: Femto Gateway Requirements", *FemtoZone Mobile World Congress.*, Barcelona 2009

- [18] FemtoForum, "Regulatory Aspects of Femtocells" Mayo 2008
- [19] Assen Golaup, Mona Mustapha, and Leo Boonchin, "Femtocell Wireless Communications. Femtocell Access Control Strategy in UMTS and LTE", *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009
- [20] 3GPP TS 22.220, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for Home NodeBs and Home eNodeBs" Septiembre 2009
- [21] Doru Calin, Holger Claussen, and Huseyin Uzunalioglu, Alcatel-Lucent, "Femtocells: On Femto Deployment Architectures and Macrocell Offloading Benefits in Joint Macro-Femto Deployments", *IEEE Communications Magazine*, Enero 2010
- [22] R4-071231. 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #44, "Open and Closed Access for Home NodeBs", Agosto 2007
- [23] 3GPP TR 25.820, "Technical Specification Group Radio Access Networks; 3G Home NodeB Study Item Technical Report" Septiembre 2008
- [24] FemtoForum, "Interference Management in UMTS Femtocells", Diciembre 2008
- [25] R4-071578. 3GPP TSG-RAN WG4 (Radio) Meeting #44bis, "Simulation results of macro-cell and co-channel Home NodeB with power configuration and open access", Octubre 2007
- [26] R4-080149. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #46, "Simulation assumptions for the block of flats scenario", Febrero 2008
- [27] R4-071941. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #45, "Simulation results for Home NodeB to Home NodeB downlink co-existence considering the impact of HNB HS utilization", Noviembre 2007
- [28] R4-071660. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #44bis, "Impact of HNB with fixed output power on macro HSDPA capacity", Octubre 2007
- [29] R4-071540. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #44bis, "LTE Home NodeB downlink simulation results with flexible Home NodeB power", Octubre 2007
- [30] R4-071661. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #44bis, "Impact of HNB with controlled output power on macro HSDPA capacity", Octubre 2007
- [31] R4-071263. 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting #44 , "System simulation results for Home NodeB interference scenario #2", Agosto 2007
- [32] J. Güvenc, M.-R. Jeong, F. Watanabe, and H. Inamura, "A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation" *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 12, Diciembre 2008
- [33] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol 8, no. 8, Agosto 2009
- [34] H.-Jo, C. Mun, J. Moon, and J.-G. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 10, Octubre 2009
- [35] E. G. Larsson y E. A. Jorswieck, "Competition versus cooperation on the MISO interference channel" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 7, Agosto 2008
- [36] J. Lindblom, E. Karipidis, y E. G. Larsson, "Selfishness and altruism on the MISO interference channel: The case of partial transmitter CSI" *IEEE Communications. Lett.*, vol. 13, no. 9, Septiembre 2009

- [37] Ana García Armada, Matilde Sánchez-Fernández, Roberto Corvaja, "Waterfilling Schemes for Zero-Forcing Coordinated Base Station Transmission" Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Padova
- [38] 3GPP TS 25.104, "Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception", Diembre 2009
- [39] 3GPP TS25.101, "Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmissión and reception", Diciembre 2009
- [40] R4-070969, "Home B output power", Ericsson, 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio) meeting, Junio 2007
- [41] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad, "Radio Network Planning and Optimization for UMTS" J, Wiley & Sons, Ltd, 2002
- [42] H. Holma and A. Toskala, "HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communicatios", J. Wiley & Sons, Ltd, 2002

