

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

FEMTOCELDAS DE UMTS

Marta Anaya de Paz

MARZO 2012

FEMTOCELDAS DE UMTS

AUTOR: Marta Anaya de Paz

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo: RFCAS

Departamento de Tecnología Electrónica y Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Marzo de 2012

Agradecimientos

A mi tutor, por la dedicación y esfuerzo puestos en este proyecto fin de carrera. Además de ser un magnífico tutor y un gran profesor es ante todo una gran persona que ha hecho que cada día en el laboratorio fuera más llevadero y productivo. Muchas gracias por esos grandes momentos vividos, por tu esfuerzo diario y por tu cercanía que harán difícil olvidar estos meses de trabajo contigo.

A mis profesores, en especial a los miembros del grupo RFCAS, por su dedicación y apoyo mostrados a lo largo de estos años.

A mi familia, en especial a mis padres y hermano, por su apoyo incondicional y su continua confianza en mí, que han hecho que consiga muchas más cosas de las que podría imaginar.

A mis compañeros. No sólo habéis sido compañeros de carrera, sino que habéis sido compañeros de horas y horas de prácticas, de simulaciones insufribles, de programas imposibles, de código impenetrable, por todo eso y mucho más, una parte de este proyecto os pertenece. En especial me gustaría nombrar a mis compañeros de laboratorio, que no podrían haber sido mejores y por último y no menos importante, no quiero acabar sin nombrar a mi otra mitad durante estos años de carrera, a mi compañero, Javi. Sabes que sin tu apoyo y ayuda nunca habría llegado hasta aquí. Mil gracias.

Por último, decir que parte de este proyecto también es de vosotros, Rafa y Gloria, gracias por haberme ayudado a ser ingeniera.

Resumen

Las femtoceldas son estaciones base de pequeña potencia que operan en el espectro con licencia. Normalmente se despliegan en interiores para mejorar la cobertura y aumentar la experiencia de usuario.

Las expectativas puestas en el aumento de la cobertura y la competición entre operadores han llevado a las empresas de telecomunicaciones a buscar nuevas soluciones. En las redes 3G que operan en frecuencias elevadas (2100 MHz), la cobertura en interiores y en zonas rurales no ha llegado a los niveles de las redes 2G, reduciendo así la experiencia de usuario en estos entornos. Las femtoceldas son una solución rápida y barata para aumentar la capacidad en interiores como casas y oficinas.

En este proyecto, se ha estudiado la capacidad para el enlace ascendente y descendente tanto de femtoceldas aisladas como de femtoceldas que conviven con otros puntos de acceso vecinos. Las simulaciones analíticas se han realizado en diferentes escenarios como pueden ser viviendas particulares y oficinas, utilizando para el cálculo de las pérdidas por propagación en interiores el modelo COST231 multi-pared y pérdidas por penetración de suelo.

Además del estudio de la interferencia co-canal inter-femtocelda también se ha hecho un estudio de la interacción entre la capa macro y femto celda ya que al compartir la misma banda de frecuencias, existirá interferencia entre ellas. En este caso, el modelo de propagación utilizado ha sido el modelo Hata-COST231.

Para todos estos análisis, se ha tenido en cuenta la esperanza y varianza de interferencia para el cálculo de la capacidad en el enlace ascendente y descendente.

Por último, se presentan una serie de técnicas y soluciones para mitigar el efecto de las interferencias.

Palabras clave

- *Femtocelda*
- *UMTS*
- *WCDMA*
- *Capacidad enlace ascendente*
- *Capacidad enlace descendente*
- *Modelo propagación interiores: Modelo COST 231 multi-pared y pérdidas por penetración de suelos*

- *Pérdidas por penetración de suelo*
- *Pérdidas por penetración de pared*
- *Pérdidas por penetración de fachadas*
- *Modelo propagación exteriores: Modelo Hata-COST 231*
- *Desviación estándar de control de potencia*

Abstract

Femtocells are a low-power cellular base stations that operate in licensed spectrum. They are typically deployed indoors to improve coverage and provide excellent user experience.

The growing capacity expectations and intensive competition between operators is constantly driving vendors to come up with new solutions. In 2100 MHz 3G UMTS networks, indoor and rural coverage are not at the level customers are used to with 2G networks. Femtocells are a cheap and fast way to offer capacity and coverage to homes and offices.

In this work, the multiservice capacity for both uplink and downlink of single and multiple femtocells has been studied. Performance of femtocells has been simulated on different environments like homes and enterprises. The COST231 multiwall and floor indoor propagation model has been used to calculate the indoor propagation loss.

In addition to the neighbored femtocells analysis, the macro-femto cell interaction has been also investigated because both of them share the same frequency band. In this case, Hata-COST321 propagation model has been used to calculate the outdoor propagation loss. In all of our simulations, the expected value and variance interference has been taken into account.

Finally, we present interference management techniques for both downlink and uplink.

Key words

- *Femtocell*
- *UMTS*
- *WCDMA*
- *Uplink Capacity*
- *Downlink Capacity*
- *Indoor Propagation loss model: COST 231 Multi-wall and floor indoor propagation loss model*
- *Wall loss*
- *Floor loss*

- *Facet loss*
- *Outdoor Propagation loss model: Hata – COST 231 propagation loss model*
- *Power control standard deviation*

Índice

CAPÍTULO 1	1
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Organización de la memoria	5
CAPÍTULO 2	7
2 Sistemas Femtocelda	7
2.1 Estado del arte	8
2.2 ¿Qué es una femtocelda?.....	9
2.3 Aspectos técnicos.....	12
2.4 Infraestructura de la red	13
2.4.1 Arquitectura y Terminología	14
2.5 Estandarización por el 3GPP.....	16
2.5.1 Aspectos Radioeléctricos.....	17
2.5.2 Configuraciones.....	17
2.5.3 Interacción entre macro y femtoceldas	19
2.5.4 Conclusiones.....	20
2.6 Futuro de las femtoceldas.....	21
CAPÍTULO 3	25
3 Estándar UMTS	25
3.1 Evolución de los sistemas de comunicación móvil.....	26

3.1.1	Primera Generación (1G).....	26
3.1.2	Segunda Generación (2G)	27
3.1.3	Tercera Generación (3G).....	27
3.2	Estándar UMTS.....	32
3.2.1	Introducción	32
3.2.2	Arquitectura	32
3.3	Tecnología WCDMA.....	38
3.3.1	Introducción	38
3.3.2	Espectro ensanchado	38
3.3.3	W-CDMA.....	42
CAPÍTULO 4		51
4	Modelos de propagación y Cálculo de la capacidad.....	51
4.1	Introducción	52
4.2	Modelo de propagación en interiores.....	52
4.3	Modelos de propagación en exteriores	53
4.4	Desvanecimiento por sombra	55
4.5	Cálculo de la capacidad de femtoceldas con canal dedicado.	55
4.5.1	Análisis para el enlace ascendente.....	56
4.5.2	Análisis para el enlace descendente	61
4.6	Cálculo de la capacidad de femtoceldas con canal compartido.	64
4.6.1	Análisis para el enlace ascendente.....	65
4.6.2	Análisis para el enlace descendente	67

4.6.3	Parámetros de simulación.....	69
CAPÍTULO 5		71
5	Capacidad del enlace ascendente	71
5.1	Introducción	72
5.2	Escenarios con femtoceldas de canal dedicado.....	73
5.2.1	Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.....	73
5.2.2	Escenario B: Femtocelda sirviendo a 5 plantas.....	78
5.2.3	Escenario C: Dos femtoceldas en un edificio de 6 plantas.....	81
5.2.4	Escenario D: Tres femtoceldas en un edificio de 9 plantas.....	85
5.2.5	Escenario E: Interferencia edificios laterales.	93
5.2.6	Extensión escenario E: Estudio con edificios de cristal.....	96
5.2.7	Escenario F: Interferencia edificios posteriores.....	99
5.2.8	Extensión escenario F: Estudio con edificios de cristal.....	103
5.3	Escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal.....	106
	Descripción y objetivos.....	106
5.3.1	ESCENARIO A.1: Estudio de la capacidad de datos femtocelda en edificios de ladrillo y cristal con interferencia macrocelda.....	109
5.3.2	ESCENARIO A.2: Estudio de la capacidad de voz femtocelda en edificios de ladrillo y cristal con interferencia macrocelda.....	114
CAPÍTULO 6		119
6	Capacidad del enlace descendente	119
6.1	Introducción	120

6.2	Escenarios con femtoceldas de canal dedicado	120
6.2.1	Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.....	121
6.2.2	Escenario B: Tres femtoceldas en un edificio de 9 plantas	123
6.2.3	Escenario C: Interferencia edificios adyacentes.....	127
6.3	Escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal.....	131
	Descripción y objetivos	131
	Resultados y conclusiones	133
CAPÍTULO 7		137
7	Conclusiones y Trabajo futuro	137
7.1	Conclusiones.....	138
7.1.1	Conclusiones sobre los escenarios con femtoceldas de canal dedicado	138
7.1.2	Conclusiones sobre los escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal	139
7.2	Trabajo futuro	140
8	Referencias.....	141
9	Glosario	143
Anexos.....		I
Anexo A: Código Matlab.....		I
Anexo B: Publicaciones		XXI
Presupuesto		LV
Pliego de condiciones.....		LVI

Índice de Figuras

Figura 2.1– Esquema de una red femtocelda.....	14
Figura 2.2– Despliegue de una femtocelda a través de ADSL.....	14
Figura 2.3– Arquitectura de acceso a red de un HNB	15
Figura 2.4– Capa de protocolos de la interfaz luh.....	16
Figura 2.5– Uso global de servicios de datos inalámbricos (Exabytes por mes)	21
Figura 3.1– Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles.....	26
Figura 3.2 – Arquitectura multifuncional	30
Figura 3.3 – Bandas de frecuencia para IMT-2000.....	31
Figura 3.4 – Arquitectura UTRAN	33
Figura 3.5 – Códigos ortogonales de factor de expansión variable OVSF.....	36
Figura 3.6 – Modulación DSSS.....	40
Figura 3.7 – Modulación DSSS.....	41
Figura 3.8 – Demodulación DSSS.....	42
Figura 3.9 – Transmisión/Recepción DSSS	42
Figura 3.10 – Asignación del ancho de banda en sistemas WCDMA	43
Figura 4.1 – Análisis de la interferencia en uplink.....	56
Figura 4.2 – Análisis de interferencia para enlace descendente.....	61
Figura 4.3 – Análisis de la interferencia macrocelda en enlace ascendente.....	65
Figura 4.4 – Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace descendente.....	67
Figura 5.1 – Coexistencia de femtoceldas y macroceldas en un escenario real.	72
Figura 5.2 – Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.	73
Figura 5.3 – Escenario A: Capacidad del servicio de datos.....	75
Figura 5.4 - Escenario A: Capacidad del servicio de voz.....	76

Figura 5.5 – Escenario A: Capacidad del servicio de voz– $N_{\text{datos}} = 7$	77
Figura 5.6 – Escenario B: Femtocelda sirviendo a 5 plantas.	78
Figura 5.7 – Escenario B: Capacidad del servicio de datos.....	79
Figura 5.8 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz.	79
Figura 5.9 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$	80
Figura 5.10 – Escenario C: Despliegue de dos femtoceldas sirviendo a 6 plantas.....	81
Figura 5.11 – Escenario C: Capacidad del servicio de datos - Femtocelda interferente superior - $C_{\text{dm}} = 0.5$	82
Figura 5.12 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz - Femtocelda interferente superior - $C_{\text{dm}} = 0.5$	83
Figura 5.13 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz - $N_{\text{datos}} = 7$ - Femtocelda interferente superior	83
Figura 5.14 – Escenario D: Despliegue de 3 femtoceldas en un edificio de 9 plantas.	85
Figura 5.15 – Escenario D: Capacidad del servicio de datos – $C_{\text{dm}} = 0.5$	87
Figura 5.16 – Escenario D: Capacidad del servicio de voz – $C_{\text{dm}} = 0.5$	88
Figura 5.17 – Escenario D: Capacidad del servicio de voz.....	88
Figura 5.18 – Escenario D: Configuración A	90
Figura 5.19 – Escenario D: Configuración B.....	90
Figura 5.20 – Escenario E: Interferencia edificios laterales.....	93
Figura 5.21 – Escenario E: Capacidad del servicio de datos – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB	94
Figura 5.22 – Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB.....	94
Figura 5.23 – Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB.....	95
Figura 5.24 – Extensión escenario E: Interferencia edificios laterales de cristal	96
Figura 5.25 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de datos – Distancia entre edificios	97
Figura 5.26 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de voz – Distancia entre edificios.....	97

Figura 5.27 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – Distancia entre edificios	98
Figura 5.28 – Escenario F: Vista desde arriba de la distribución de los edificios.	99
Figura 5.29 – Zona de interferencia del edificio 3.....	100
Figura 5.30 – Vista desde arriba de la planta central.....	100
Figura 5.31 – Escenario F: Capacidad del servicio de datos - $L_{\text{fachada}} = 12$ dB	101
Figura 5.32 – Escenario F: Capacidad del servicio de voz - $L_{\text{fachada}} = 12$ dB.....	101
Figura 5.33 – Escenario F: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ - $L_{\text{fachada}} = 12$ dB	102
Figura 5.34 – Extensión Escenario F: Vista desde arriba de la distribución de los edificios....	103
Figura 5.35 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de datos – Distancia entre edificios	104
Figura 5.36 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de voz – Distancia entre edificios	104
Figura 5.37 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – Distancia entre edificios	105
Figura 5.38 –Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace ascendente.....	106
Figura 5.39 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE datos – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB	110
Figura 5.40: Capacidad del servicio de datos – Usuarios MUE datos – $L_{\text{fachada}} = 6$ dB.....	110
Figura 5.41 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE voz – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB	111
Figura 5.42 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE voz – $L_{\text{fachada}} = 6$ dB	112
Figura 5.43 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos en función del número de usuarios MUE de voz.....	113

Figura 5.44 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 12$ dB	115
Figura 5.45 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 6$ dB	115
Figura 5.46 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE voz – $L_{fachada} = 12$ dB	116
Figura 5.47 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE voz – $L_{fachada} = 6$ dB	117
Figura 6.1 – Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.	121
Figura 6.2 – Escenario B: Despliegue de 3 femtoceldas en un edificio de 9 plantas	123
Figura 6.3 – Escenario B: Capacidad del servicio de datos – $C_{dm} = 0.5$	124
Figura 6.4 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $C_{dm} = 0.5$	125
Figura 6.5 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $N_{datos} = 16 - C_{dm} = 0.5$	125
Figura 6.6 – Escenario C: Interferencia edificios laterales	127
Figura 6.7 – Escenario C: Capacidad del servicio de datos – $C_{dm} = 0.5$	128
Figura 6.8 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz – $C_{dm} = 0.5$	128
Figura 6.9 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz – $N_{datos} = 16 - C_{dm} = 0.5$	129
Figura 6.10 – Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace descendente.....	131
Figura 6.11 – Valor medio de las pérdidas de propagación del enlace BS → FUE – Distancia entre BS y edificio = 100m.....	133
Figura 6.12 – Escenario B: Capacidad downlink del servicio de datos – Altura de antena de usuario.....	134
Figura 6.13 – Escenario B: Capacidad donwlink del servicio de voz – Altura de antena de usuario.....	134
Figura 6.14 – Capacidad del servicio de voz para 3 valores de L_{extra}	136
Figura 6.15 – Capacidad del servicio de datos para 3 valores de L_{extra}	136

Índice de Tablas

Tabla 3.1 – Tablas binarias del enlace descendente	35
Tabla 4.1 – Parámetros de simulación	69
Tabla 5.1- Escenario A: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%	77
Tabla 5.2 – Escenario B: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%	80
Tabla 5.3 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - $C_{dm} = 0.5$	84
Tabla 5.4 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - $C_{dm} = 0$	84
Tabla 5.5 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Femtocelda interferente inferior - $C_{dm} = 0.5$	84
Tabla 5.6 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Femtocelda interferente inferior - $C_{dm} = 0$	84
Tabla 5.7 – Escenario D: Factor de interferencia intercelular en cada punto de cálculo para cada planta	86
Tabla 5.8 – Escenario D: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% – $C_{dm} = 0.5$	89
Tabla 5.9 – Escenario D: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% – $C_{dm} = 0$	89
Tabla 5.10 – Factor de interferencia intercelular en cada punto de cálculo para cada planta. .	91
Tabla 5.11 – Capacidad del servicio de datos para las dos configuraciones	91
Tabla 5.12 – Capacidad del servicio de voz para las 3 configuraciones.	92
Tabla 5.13 – Capacidad del servicio de voz para las 3 configuraciones – $N_{datos} = 7$	92
Tabla 5.14 – Escenario E: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%	95

Tabla 5.15 – Extensión Escenario E: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1%	98
Tabla 5.16 – Escenario F Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Distintas fachadas ladrillo	102
Tabla 5.17 – Extensión Escenario F: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Distancia entre edificios	105
Tabla 5.18 – Parámetros para el balance de enlace	108
Tabla 5.19 – Parámetros modelo de propagación para el enlace MUE-Femtocelda	109
Tabla 5.20 – Escenario A.1. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuario MUE de datos.	110
Tabla 5.21 – Escenario A.1. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE de voz	112
Tabla 5.22 – Escenario A.1. Caso 2: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE.....	113
Tabla 5.23 – Escenario A.1. Caso 3: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE.....	114
Tabla 5.24 – Escenario A.2. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de voz para una probabilidad de desbordamiento del 1 % en función del número de usuario MUE de datos.	116
Tabla 5.25 – Escenario A.2. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de voz en función del número de usuario MUE de voz.	117
Tabla 5.26 – Escenario A.2. Caso1: Capacidad del servicio de voz en función del número y tipo de usuarios MUE – $N_{\text{datos}} = 7$	118
Tabla 6.1 – Escenario A: Capacidad downlink en función del factor de ortogonalidad.....	122
Tabla 6.2 – Escenario B: Capacidad downlink en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación.....	126

Tabla 6.3 – Escenario C: Capacidad downlink para el servicio de voz en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación	129
Tabla 6.4 – Escenario C: Capacidad downlink para el servicio de datos en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación	129
Tabla 6.5 – Escenario D: Capacidad del servicio conjunto voz + datos en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación.	130
Tabla 6.6 – Parámetros para el balance de enlace entre BS y terminal FUE	132

CAPÍTULO 1

1 Introducción

1.1 Motivación

Este proyecto viene motivado por las cada vez más realistas conclusiones que hablan de una tendencia clara a la convergencia fijo-móvil, en la que las femtoceldas pueden jugar un papel importante, además de suponer una solución relativamente sencilla y económica al tradicional problema que arrastran los operadores móviles de mejorar la calidad de servicio en espacios cerrados.

En la actualidad, las nuevas tecnologías de telecomunicaciones, siguen una tendencia hacia la integración de toda clase de servicios, mediante una red global de comunicaciones. Actualmente, se pretende que dicha red tenga una accesibilidad total, es decir, que cualquier usuario pueda acceder a ella desde cualquier parte, sin tener que estar atado a una red fija, simplemente mediante la utilización de un terminal móvil.

Tecnologías móviles actuales de tercera generación como UMTS, son coherentes con la nueva tendencia de las telecomunicaciones, pero no están exentas de problemas. La creciente demanda de acceso a servicios 3G ha provocado la necesidad de mejorar la calidad de servicio en espacios en los que responder a esta demanda puede constituir un reto. Este es el caso de zonas rurales e interiores, donde la cobertura de las celdas ordinarias es mala o insuficiente. Como solución a este problema surgieron las femtoceldas cuyo estudio será el marco de trabajo de este proyecto.

Las femtoceldas son un claro ejemplo de convergencia fijo-móvil. Una femtocelda es una estación base en miniatura conectada a la conexión de banda ancha (ADSL, Cable, etc.) de la vivienda/oficina que permite ofrecer una cobertura 3G a un terminal móvil, sustituyendo de forma completa y automática a la cobertura y conexión con las estación base del operador móvil.

Estos dispositivos no sólo tienen como ventaja la mejora de cobertura de los sistemas celulares basados en UMTS dentro de una oficina, vivienda o comercio sino que además mejoran la experiencia de usuario ofreciendo un enlace de mayor calidad, una posible reducción del costo dentro de la cobertura femtocelda y la posibilidad de disponer de nuevos servicios dentro del hogar y todo ello utilizando los mismos teléfonos móviles 3G de los que ya se dispone.

En cuanto a los operadores móviles también encontrarán importantes ventajas con esta aproximación si consiguen un factor de penetración lo suficientemente alto. Con ese

grado de penetración se reduciría sustancialmente la inversión destinada a poner en marcha nuevas macroceldas, además de obtener una reducción de la carga-tráfico en ellas y una mejora en la eficacia del espectro.

Sin embargo, no todo son ventajas en el uso de este tipo de dispositivos. El principal problema es el impacto que puede producir el uso de las femtoceldas en los sistemas móviles de tercera generación ya existentes. Por ello, se pondrá especial interés en el estudio de las interferencias entre macroceldas y femtoceldas (utilizan las mismas frecuencias) estudiando en detalle la capacidad downlink y uplink.

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 se ha expuesto en la introducción las femtocelda son sistemas que aún no están totalmente desarrollados y que se encuentran en una fase de estudio y especificación por parte de los organismos de estandarización como el 3GPP. Por tanto, este proyecto buscará estudiar el presente y posible futuro de las femtoceldas, siendo el estudio de la capacidad y la gestión de interferencias la parte central de este proyecto. Así, los objetivos a conseguir serán los siguientes:

- En la primera etapa del proyecto, se profundizará en el estudio teórico general del sistema UMTS. La intención es conocer en detalle todos los fundamentos, requerimientos, espectro utilizado, velocidades binarias, arquitectura de la red, servicios y demás características que nos sirvan de base para el desarrollo del proyecto. También se profundizará en el estudio teórico de la tecnología Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) y su uso en sistemas UMTS.

- Se llevará a cabo un estudio de las características que presentan las femtoceldas, potencia requerida, frecuencia de uso, etc. Por otro lado, se hará especial énfasis en el uso y manejo de estos dispositivos para lograr su integración en el núcleo de las redes móviles y la evaluación de las ventajas e inconvenientes de las distintas aproximaciones al problema existentes actualmente.
- Otro de nuestros objetivos será conocer en profundidad las características que presentan los entornos interiores y exteriores y cómo influyen en la calidad de la señal recibida, además de analizar las diferencias sustanciales que existen entre ellos.
- A partir de este punto se buscará lograr el objetivo principal de este proyecto que consistirá en estimar la capacidad uplink y downlink de femtoceldas a través de un cálculo analítico. En primer lugar nos centraremos en los escenarios en los que se desplieguen femtoceldas que hagan uso de un canal dedicado, es decir, que no compartan la misma banda de frecuencias que las macroceldas.
- Por último, se realizará el cálculo analítico para la capacidad uplink y downlink de femtoceldas que compartan la misma banda de frecuencias que la red macrocelda cercana.

Dado que la aplicación principal de las femtoceldas está dirigida al aumento de la cobertura en espacios cerrados, a lo largo del proyecto se considerarán varios escenarios de estudio atendiendo a sus características:

- Edificios con distintas características y para usos diferentes (viviendas y/u oficinas).
- Edificios cercanos con distintos materiales de fachada (ladrillo y cristal).

1.3 Organización de la memoria

La memoria va a estar estructurada en siete capítulos que recogen desde un resumen teórico de la tecnología de interés hasta los resultados y conclusiones de las simulaciones que se han llevado a cabo.

El primero de ellos, en el que nos encontramos, consiste en una introducción al presente proyecto fin de carrera.

El capítulo 2, recoge el estado del arte de los sistemas femtocelda así como sus aspectos técnicos, infraestructura de la red y un resumen de la estandarización llevada a cabo por el organismo 3GPP para estos sistemas.

El tercero presenta un resumen de la tecnología WCDMA para UMTS, partiendo de una visión general de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles para pasar a un estudio más en profundidad del estándar UMTS en el que se basan los sistemas de tercera generación, principalmente en Europa, y por tanto nuestras femtoceldas. Este capítulo finaliza con un último apartado dedicado a la Tecnología WCDMA cuyas características hacen que sea una tecnología muy atractiva para las comunicaciones móviles.

El capítulo 4, se centra en el estudio de los modelos de propagación tanto para interiores como exteriores, utilizados en este proyecto. Además se presenta en profundidad el procedimiento y fórmulas utilizadas para estimar la capacidad femtocelda tanto para el enlace ascendente como descendente. También se muestran los parámetros principales utilizados en las simulaciones.

A lo largo de los capítulos 5 y 6 se plasman los resultados obtenidos para el enlace ascendente y descendente respectivamente. Para cada uno de los escenarios se da una descripción y análisis que recoge las características y consideraciones de cada uno de ellos. Después se presentan los resultados a través de gráficos y tablas y se termina con las conclusiones de cada uno de ellos.

Por último, en el capítulo 7 se resumen las conclusiones obtenidas y el trabajo futuro esperado.

CAPÍTULO 2

2 Sistemas Femtocelda

2.1 Estado del arte

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 como en rurales. Sin embargo, el aumento en la demanda de servicios de datos a alta velocidad ha hecho que la capacidad antes ofrecida por estas estaciones base no sea suficiente. Las soluciones que se proponen para poder mantener este crecimiento son aumentar el ancho de banda o bien reducir el tamaño de las celdas de cobertura. La primera opción conlleva explotar un recurso limitado como es el espectro radioeléctrico, por lo que 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 costosa para los operadores debido a los altos gastos en infraestructura. Es en este punto es donde entran en juego las femtoceldas.

El punto de partida del proyecto *Femtoceldas de UMTS*, se encuentra en las referencias [1] y [2], donde se ha estudiado el concepto de femtocelda y el impacto tanto técnico como económico de adaptar este tipo de dispositivos para conseguir un despliegue comercial. Adicionalmente, [3] presenta una breve introducción en la que se establece a las femtoceldas como solución a los problemas de cobertura en determinados escenarios interiores. Además presenta algunos problemas del despliegue de femtoceldas tales como la instalación de la antena femtocelda por parte del usuario y la discusión entre acceso abierto o cerrado a los sistemas femtoceldas que hacen de la gestión de interferencia uno de los mayores escollos que debe sortear esta tecnología. 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 [4], se ha discutido el despliegue de femtoceldas usando WiMAX, UMTS y WiFi. En [5] y [6], 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. En [7], ha sido estudiada la capacidad de las femtoceldas UMTS en despliegues a gran escala sin tener en cuenta la varianza en la interferencia [Ver ecuación 6 de la referencia]. En [8], se analiza y estudia la interferencia entre macroceldas y femtoceldas

para distintos escenarios. También en este caso, se ha ignorado el efecto de la varianza de la interferencia. En [9], se ha estudiado, sin tener en cuenta aquí tampoco el efecto de la varianza, la capacidad y cobertura del enlace uplink para femtoceldas UMTS en entornos indoor tipo oficina. Volviendo a [1], también se investiga la fiabilidad del sistema al utilizar la misma frecuencia tanto en femtoceldas como en macroceldas. Se proponen técnicas como la autoconfiguración y el acceso público para mejorar el rendimiento final. En [10], se propone el uso de una atenuación adaptativa en el receptor femtocelda y la limitación de la potencia transmitida por los usuarios de las femtoceldas para reducir el efecto de la interferencia femtocelda. En [11], se ha considerado una red UMTS de dos niveles (two-tier), estudiando la capacidad uplink del sistema global. Por otro lado en [12] y [13] se 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 coordinación entre estaciones base macro y femtocelda. En [14] y [15], se estudia la capacidad uplink y downlink en microceldas desplegadas en autopistas teniendo en cuenta el valor de esperanza y varianza de las interferencias que nos servirá de referencia para nuestros cálculos.

Por último en las referencias [16], y [17] encontramos un enfoque económico de la introducción de sistemas femtocelda, en la que las empresas como Orange señalan a éstas como una herramienta para ofrecer mejor cobertura en interiores y especialmente mejores tasas binarias a los usuarios.

2.2 ¿Qué es una femtocelda?

Básicamente una femtocelda es una pequeña estación base de baja potencia para el uso de servicios móviles en hogares o negocios. Dicha estación base se integra en la red móvil mediante una conexión de banda ancha, 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 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 del 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 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.

➤ *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.

➤ *Nuevas oportunidades*

Finalmente, el ya comentado aumento del volumen de negocio supone una oportunidad única para la creación de nuevas empresas y aplicaciones. Al tener nuestra propia red móvil en casa podremos acceder a servicios automáticos de mensajes de texto alarmándonos de situaciones concretas. 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:

➤ *Interferencias*

Respecto al enlace entre usuarios y puntos de acceso, las femtoceldas pueden compartir el espectro radioeléctrico usado por la red móvil. En el caso de las femtoceldas se espera que los puntos de acceso sean instalados por el usuario en cualquier localización interior, haciendo imposible realizar una planificación a priori que permita realizar una gestión de interferencias

basada en la reutilización de frecuencias como ocurre en las redes celulares clásicas. 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 las 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 [16], 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 las 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.

2.3 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 capacidad del enlace inalámbrico depende de la relación señal a interferencia más ruido (SINR) del enlace que a su vez depende de multitud de características del enlace como la potencia emitida por el

transmisor, la cantidad de potencia interferente, el nivel de ruido, pérdidas por propagación o la existencia de desvanecimiento de la señal. Por lo tanto, el modo de alcanzar tasas binarias elevadas es maximizando estos parámetros, lo que en definitiva se atribuye a las siguientes características:

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

Las dos primeras características suponen una mejora en la capacidad debido a un aumento en la relación SINR, mientras que la tercera supone un aumento en el uso del ancho de banda y de la potencia disponible por el transmisor. 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.

2.4 Infraestructura de la red

Durante el siguiente apartado vamos a realizar una breve descripción de la infraestructura de un sistema femtocelda. En la Figura 2.1 encontramos el punto de acceso femtocelda en el centro de la vivienda, ofreciendo servicios de voz y datos a multitud de dispositivos. Este punto se encuentra conectado con el router encargado de ofrecer conectividad 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.

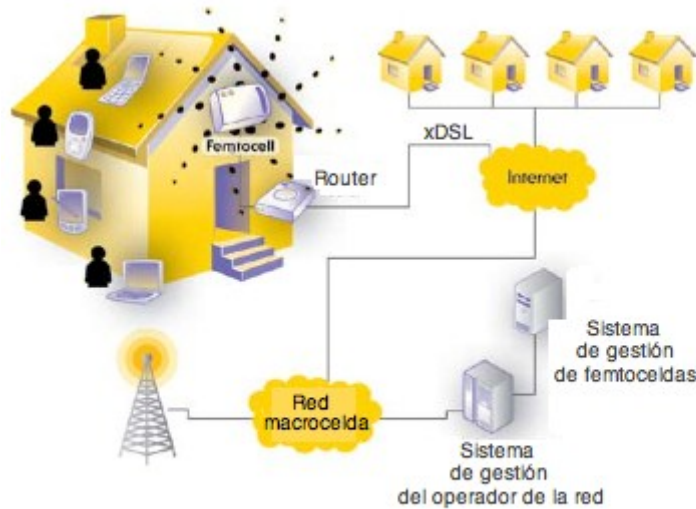


Figura 2.1– Esquema de una red femtocelda

En la siguiente representación, Figura 2.2 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 Wi-Fi, y el teléfono fijo mediante voz sobre IP.

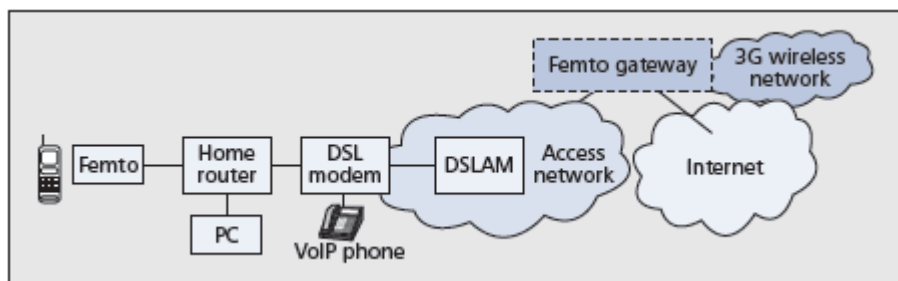


Figura 2.2– Despliegue de una femtocelda a través de ADSL

2.4.1 Arquitectura y Terminología

Desde el punto de vista de la arquitectura, una femtocelda es una extensión de la infraestructura de la red móvil, y puede considerarse dentro del paradigma formado por ésta. Sin embargo, también hace uso de la red IP, de modo que es necesaria una buena calidad en este tipo de servicio. 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 al punto de acceso femtocelda. El equipo local del usuario se comporta como un nodo a través de la interfaz Uu (interfaz aérea) y se conecta a la red móvil a través de la red IP mediante la interfaz Iuh. El encargado de este traspaso es el HNB.
- HNB-GW “Home NodeB Gateway”: Nos referimos a HNB-GW como la interfaz de punto de acceso femtocelda. Es el encargado de concentrar un número grande de HNBs en una interfaz IuCS/PS para introducir la información en el núcleo central de la red IP.
- HMS “Home Node B Management System”: Es el elemento encargado de gestionar los recursos de los HNBs.

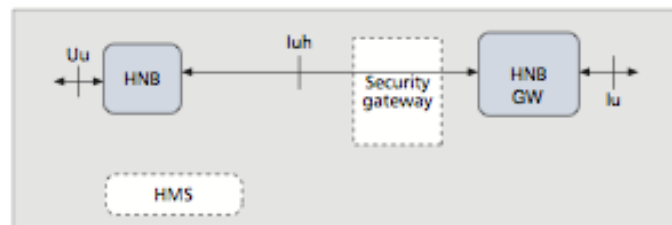


Figura 2.3– Arquitectura de acceso a red de un HNB

En la Figura 2.3 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 Iuh. Además, este esquema aporta seguridad mediante el SeGW “Security Gateway”, 3GPP especifica IPsec en modo túnel como mecanismo de seguridad. La conexión entre el HNB-GW y el núcleo de la red se realiza mediante la interfaz IuCS/IuPS, este hecho implica que aunque existan múltiples HNBs la información se concentrará en una sola interfaz a través del HNB-GW, satisfaciendo el requerimiento del 3GPP y de muchos operadores, los cuales no consideran realizar cambios en los sistemas del núcleo central de la red IP debido a la aparición de las femtoceldas. Respecto a

la interfaz de radio entre el HNB y los terminales femtocelda, salvo por alguna pequeña modificación como la inclusión de los grupos cerrados de suscriptores, se mantienen los estándares actuales. En la siguiente figura mostramos las capas de protocolos de la interfaz Iuh, entre el HNB, SeGW y HNB-GW.

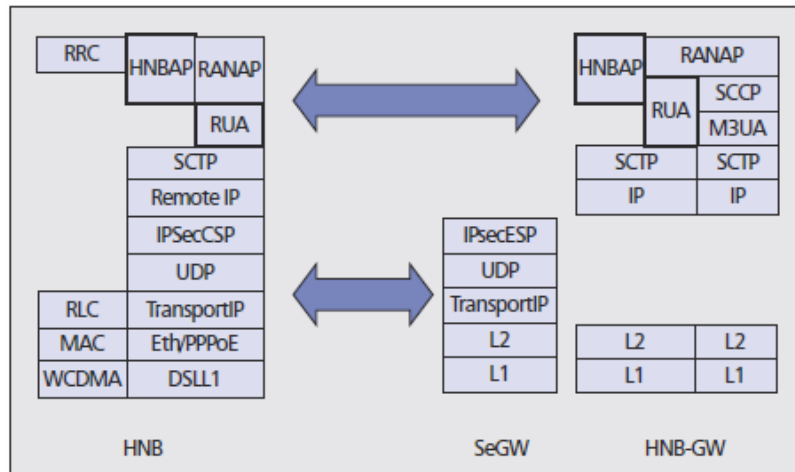


Figura 2.4– Capa de protocolos de la interfaz Iuh

Destacar la aparición de dos nuevos protocolos:

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

2.5 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.

2.5.1 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 macro celdas. Por esta razón es necesario realizar un estándar de modo que cualquier empresa interesada en la fabricación de productos que utilicen la tecnología femtocelda solvente 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.

2.5.2 Configuraciones

En la referencia [6], 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 tipo de configuración, estas son:

1) 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.

2) *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...

3) *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 para 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 HNBs y utilizar solo la parte limpia.

En principio la configuración D se presentó como una solución en el caso de femtoceldas operando 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 macro red, 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.

En este proyecto nos basaremos en las configuraciones A, B y C con alguna modificación en algunos casos para simular las situaciones más pesimistas en relación a interferencias en las que nos podamos encontrar.

2.5.3 Interacción entre macro y femtoceldas

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

- a) HNB fuera de cobertura GSM o UMTS ofrecido por macroceldas
- b) HNB dentro de cobertura GSM suministrada por una macrocelda
- c) HNB dentro de cobertura UMTS suministrada por una macrocelda, ambos entre la misma frecuencia

d) 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 femtoceldas. 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.

2.5.4 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.

2.6 Futuro de las femtoceldas

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

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

El crecimiento del uso de servicios de datos viene dado por la alta penetración de los dispositivos Smartphone y del aumento del uso por dispositivo. El efecto es que el total del uso de datos está incrementándose en un 108% por año, como muestra la Figura 2.5.

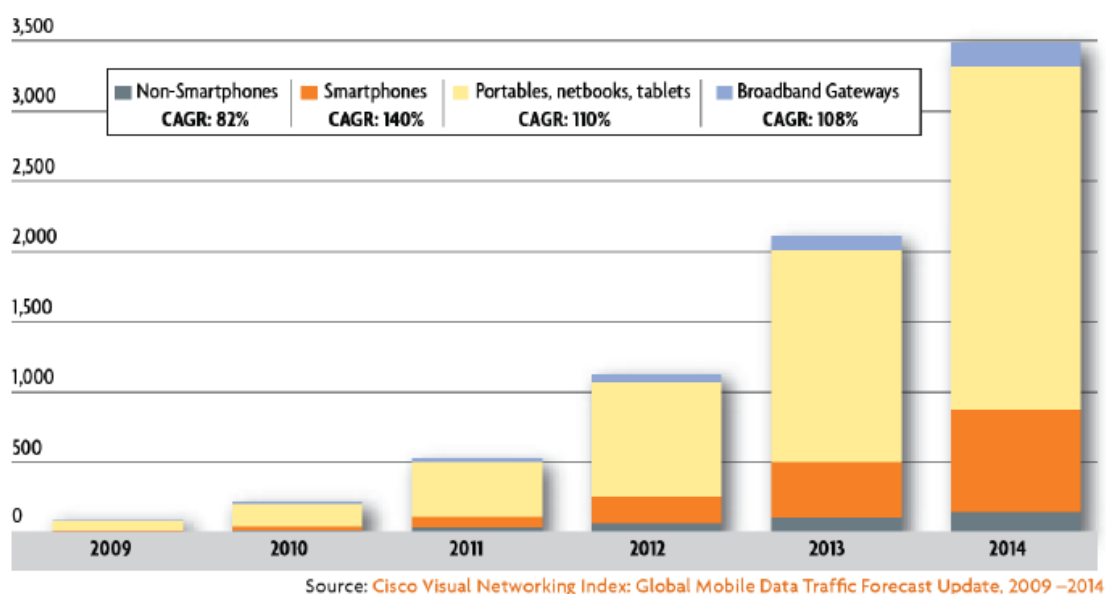


Figura 2.5– Uso global de servicios de datos inalámbricos (Exabytes por mes)

Según un estudio realizado por Informa [18] sobre el uso que se hace de los dispositivos móviles en interiores, se espera que en el año 2012 el 55% del uso de servicios de datos se

haga dentro de casa y el 26% en la oficina. La proporción que se hará en otros lugares (fuera de casas/oficinas o en movimiento) será el otro 19%. Si cada consumidor tuviera una femtocelda en su casa u oficina una gran porción (81%) del total de su tráfico desaparecería de la red celular macrocelda.

Respecto a la repercusión de las femtoceldas en un futuro próximo, [19] estima que en 2012 habrá instalados un total de 70 millones de unidades de este tipo de dispositivos en todo el mundo. 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.

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... También esta tecnología se perfila como la solución a los problemas derivados de 3G, las empresas apuestan por ella como unos de los pilares de apoyo de 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.

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 por mes, 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 de servicios femtocelda se encuentre entre 10 y 15 euros al mes, independientemente del servicio ADSL contratado.

CAPÍTULO 3

3 Estándar UMTS

3.1 Evolución de los sistemas de comunicación móvil

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

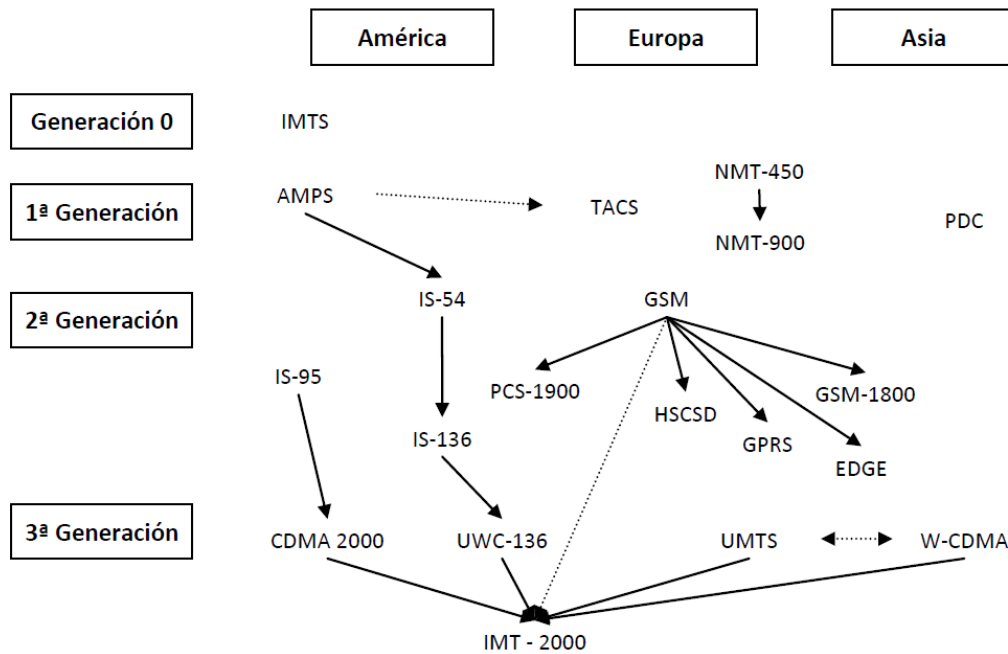


Figura 3.1– Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles

3.1.1 Primera Generación (1G)

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

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

3.1.2 Segunda Generación (2G)

Las limitaciones de los sistemas de 1ª generación comenzaron a hacerse evidentes a finales de los años 80, por lo que se comenzó a trabajar en el desarrollo de nuevos estándares.

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

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

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

3.1.3 Tercera Generación (3G)

La primera y segunda generación de sistemas de comunicación móvil tuvieron como objetivo primordial dar soporte a comunicaciones de voz y aunque pueden ser usadas para transmitir datos a baja velocidad, no satisfacen los requerimientos de transmisión de grandes volúmenes de información a altas velocidades entre terminales inalámbricas y la red fija necesarios para aplicaciones como videoconferencias, conexión a internet, vídeo y audio.

De esta forma, aunque los sistemas de 2ª Generación se encuentran aún en funcionamiento, la necesidad de una mayor capacidad y el limitado conjunto de servicios que con ellos puede ofrecerse hizo que diversos organismos de estandarización, coordinados por la ITU (International Telecommunication Union), comenzaron a trabajar a finales de los años 80 en la especificación de un nuevo conjunto de sistemas que hiciera frente a esta demanda. El resultado de este esfuerzo conjunto fue la definición de IMT-2000 (International Mobile Telecommunications - 2000), conocido actualmente como 3G.

3.1.3.1 *International Mobile Telecommunication- 2000 (IMT-2000)*

A finales de los años la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) formó un grupo de trabajo con el objetivo de valorar y especificar los requisitos de las normas celulares del futuro para la prestación de servicios de datos y multimedia a alta velocidad. A dicha iniciativa se le dio originalmente el nombre de FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System). Posteriormente fue renombrada como IMT-2000 (International Mobile Telecommunication 2000).

IMT-2000 es la norma mundial para la tercera generación (3G) de comunicaciones inalámbricas, definida por un conjunto de recomendaciones ITU. La IMT-2000 constituye un marco para el acceso inalámbrico a escala mundial ya que permite conectar diversos sistemas de redes terrenales y por satélite.

Las actividades que realiza la ITU en lo que concierne a la IMT-2000 abarcan la normalización internacional que incluye especificaciones sobre el espectro de radiofrecuencias de carácter técnico para las componentes radioeléctricas y de red, la asistencia técnica y los estudios sobre aspectos de reglamentación y política. En Estados Unidos y Asia, esta definición se encuentra implementada en el estándar CDMA-2000, que aprovecha parte de la infraestructura de IS-95.

3.1.3.2 *Requerimientos de un sistema de tercera generación.*

Para asegurar el éxito de los servicios 3G, se ha de proporcionar a los usuarios unas comunicaciones muy eficientes, con una alta velocidad y calidad y, además, fáciles de utilizar. Los sistemas de 3G deben ofrecer:

- Transmisión simétrica/ asimétrica de alta fiabilidad.
- Uso de ancho de banda dinámico, en función de la aplicación.
- Velocidades binarias mucho más altas: 144 kbit/s en alta movilidad, 384 kbit/s en espacios abiertos y 2 Mbit/s en baja movilidad.
- Soporte tanto de conmutación de paquetes (IP) como de circuitos.
- Soporte IP para acceso a Internet (navegación www), videojuegos, comercio electrónico, y vídeo y audio en tiempo real.
- Diferentes servicios simultáneos en una sola conexión.
- Calidad de voz como en la red fija.

- Soporte radioeléctrico flexible, con utilización más eficaz del espectro, con bandas de frecuencias comunes en todo el mundo.
- Personalización de los servicios, según perfil de usuario.
- Incorporación gradual en coexistencia con los sistemas actuales de 2G.
- Itinerancia (roaming), incluido el internacional, entre diferentes operadores y tipos de redes.
- Ambientes de funcionamiento marítimo, terrestre y aeronáutico.
- Capacidad de terminales multibanda y multientorno.
- Economías de escala y un estándar global y abierto que cubra las necesidades del mercado de masa.
- Provisión de un “ambiente local virtual” VHE: el usuario podrá recibir el mismo servicio independiente de su ubicación geográfica.

En Europa, el Instituto Europeo de Telecomunicaciones (ETSI) ha propuesto la norma paneuropea de tercera generación UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). UMTS es miembro de la familia global IMT-2000 del sistema de comunicaciones móviles de “tercera generación” de la ITU.

En Estados Unidos el Instituto Americano de Estándares (ANSI) trabajó en la evolución de sistemas AMPS/IS-136 y CDMA/IS-95. Por otra parte, en Japón la Asociación de Industrias de la Radio y Radiodifusión (ARIB) se centró en CDMA para la elaboración de normas de tercera generación.

Los organismos regionales de normalización ETSI (Europa), TIPI (EUA), ARIB (Japón) y TTA (Corea) trabajaron en propuestas separadas de la norma W-CDMA, estos entes regionales sumaron esfuerzos en el Proyecto de Asociación 3G (3GPP), y hoy en día existe una norma conjunta W-CDMA.

3.1.3.3 Arquitectura del Sistema

Una de las ideas generales del IMT-2000 es brindar servicios en cualquier parte del mundo a través del empleo de diversas tecnologías integradas en un solo sistema, ajustándose a diferentes entornos geográficos y densidades de tráfico. Por lo tanto, se ha establecido una estructura de capas de células, clasificándose en cuatro categorías, las cuales pueden funcionar simultáneamente dentro de una misma área geográfica.

- Megaceldas: tienen radios desde 100 hasta 500 Km. Ofrecen amplia cobertura para zonas con baja capacidad de tráfico a través del uso de satélites no geoestacionarios. Soportan velocidades de estaciones móviles elevadas.
- Macrocelas: tienen radios desde 1 hasta 35 Km. Se emplean para ofrecer coberturas en lugares rurales, carreteras y poblaciones cercanas.
- Microcelas: tienen radios desde 50 m hasta 1 Km. Ofrecen servicio a usuarios fijos o que se muevan lentamente con elevada densidad de tráfico.
- Picoceldas: tienen radios menores que 50 m. Ofrecen coberturas localizadas en interiores.
- Femtoceldas: se espera que sea el último nivel de la arquitectura y que pueda mejorar la cobertura móvil en interiores a través de la conexión de pequeñas estaciones base (HNB) a través de una conexión de banda ancha.

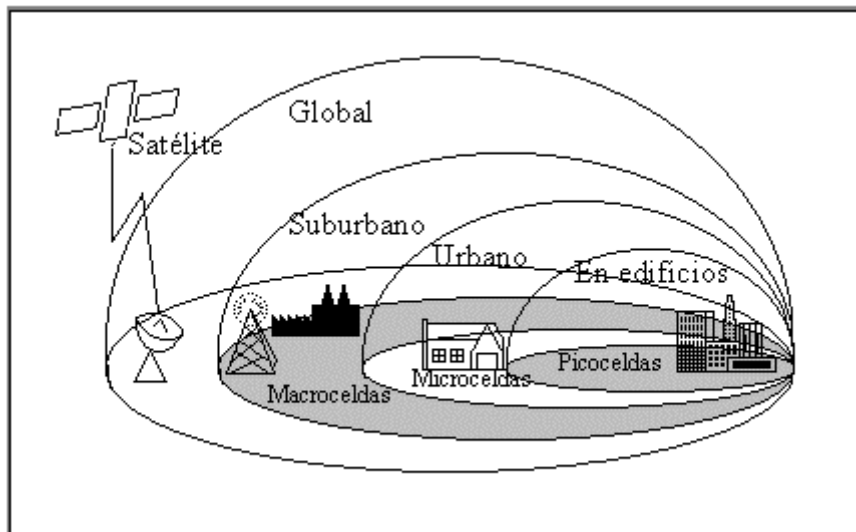


Figura 3.2 – Arquitectura multifuncional

3.1.3.4 Localización del espectro de los sistemas de tercera generación

El trabajo de desarrollo de los sistemas de tercera generación comenzó en la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones (WARC) de la Unión Internacional de Comunicaciones (ITU) en su encuentro de 1992, donde se identificaron las frecuencias en torno a 2 GHz como válidas para el uso en los futuros sistemas móviles 3G del estándar IMT-2000 tanto terrestres como satélite.

Dentro del marco de trabajo del IMT-2000, se definen cinco interfaces radio para los sistemas de tercera generación basados en tecnología CDMA o TDMA. El objetivo original del estándar IMT-2000 para los sistemas 3G fue tener un interfaz único y global. Este objetivo se logró cuando la tecnología WCDMA se instauró como la más dominante en los despliegues comerciales. La misma interfaz radio WCDMA está desplegada en Europa, Asia, Australia, en el norte y sur de América y en África.

La mayoría de los despliegues de WCDMA usan el espectro definido por IMT-2000 alrededor de los 2 GHz: 1920-1980 MHz para el enlace ascendente y 2110-2170 para el enlace descendente en modo FDD.

Debido al crecimiento de Internet, las Intranets, el correo y el comercio electrónico y los servicios de transmisión de imágenes y sonido; han elevado la demanda de servicios de banda ancha, teniéndose que incrementar los requerimientos de espectro para IMT-2000.

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones WRC-2000 celebrada en Estambul en el año 2000, proporciona tres bandas extras quedando compuesto el espectro para IMT-2000 de la siguiente forma:

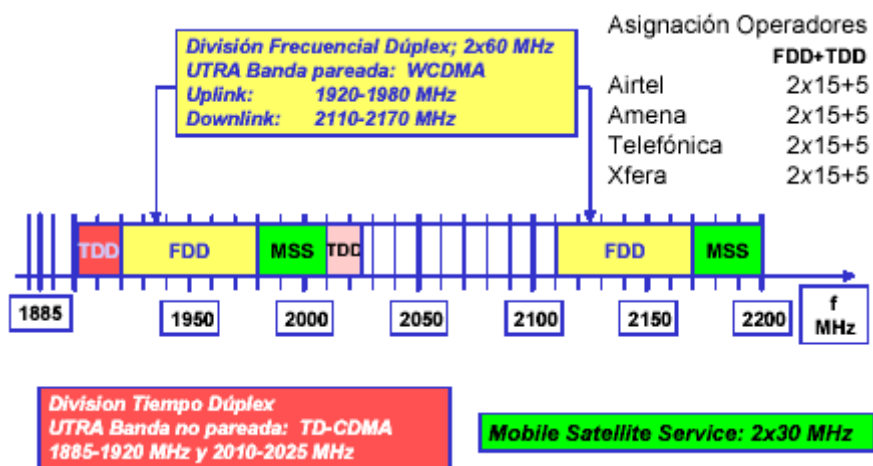


Figura 3.3 – Bandas de frecuencia para IMT-2000

3.2 Estándar UMTS

3.2.1 Introducción

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) constituye la visión europea con capacidades 3G como parte de la familia de estándares IMT-2000. UMTS es la evolución lógica de CDMA-One a la tercera generación.

El término UMTS es principalmente utilizado en Europa. El Release 99 del 3GPP es la primera definición de este estándar que consta de un conjunto de especificaciones organizadas en series. Dichas especificaciones se encuentran publicadas en la web del 3GPP <http://www.3gpp.org>.

La modalidad más habitual de UMTS es la que utiliza la interfaz aire de W-CDMA, aunque el sistema soporta otras.

Al contrario de lo que sucedía con otras evoluciones de GSM como EDGE, UMTS necesita de nuevas bandas de frecuencia y nuevas estaciones base para su despliegue.

Teóricamente, UMTS soporta una tasa de transferencia máxima de 384 Kbps para conmutación de paquetes, lo que en su momento era una velocidad muy superior a la ofrecida por la evolución de los sistemas GPRS, EDGE.

3.2.2 Arquitectura

El sistema UMTS se estructura en dos planos:

- La red de telecomunicaciones cuyo objeto es asegurar el transporte de la información extremo a extremo.
- La red de gestión con funciones auxiliares necesarias para la operación de la red: gestión de abonados, gestión de servicios contratados, facturación...

En esta breve descripción del sistema nos centraremos exclusivamente en la red de telecomunicaciones, que a su vez se encuentra dividida en diferentes sub-sistemas:

- Core Network (CN)
- UMTS Radio Access Network (UTRAN)
- User Equipment (UE)

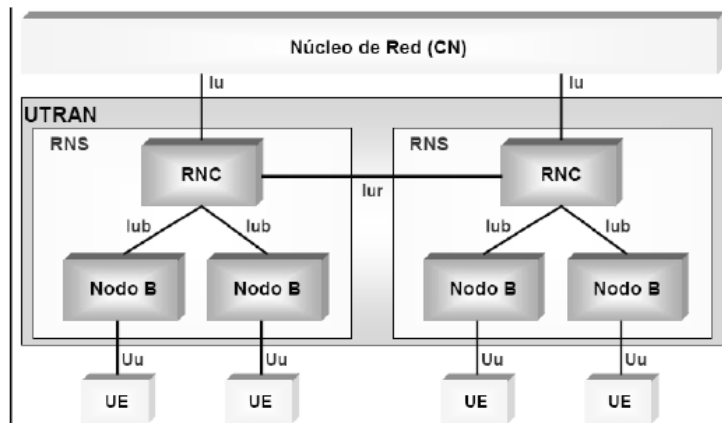


Figura 3.4 – Arquitectura UTRAN

3.2.2.1 User Equipment (UE)

El UE consiste en dos partes:

- El equipo móvil (Mobile Equipment ME) es el terminal radio usado para la comunicación radio sobre la interfaz Uu.
- El UMTS Subscriber Identity Module (USIM) es una tarjeta que contiene la identidad del suscriptor, algoritmos de cifrado y autenticación, PIN y PUK (códigos de acceso y bloqueo), etc.

3.2.2.2 Core Network (CN)

El núcleo de red proporciona funciones de transporte, gestión e interconexión con otras redes fijas o móviles. Dentro de la definición del estándar se preveía un desarrollo evolutivo de este subsistema partiendo de la infraestructura actual de la red GSM / GPRS como comienzo de una migración hacia una red basada totalmente en el protocolo IP.

HLR (Home Location Register)

El Home Location Register es una base de datos única para la red (aunque puede estar físicamente distribuida) con información detallada de cada suscriptor autorizado a utilizar la red. El HLR almacena información de todas las tarjetas SIM del operador así como los servicios contratados por el usuario.

MSC/VLR (Mobile Services Switching Centre/ Visitors Location Register)

El MSC es la pieza central de una red basada en conmutación de circuitos, el cual es usado tanto por el sistema GSM como por UMTS. Esto es posible porque uno de los objetivos del 3GPP fue conectar la red UTRAN con la red central de GSM/GPRS. Dentro del MSC se encuentra el VLR, que contiene una copia del perfil de los usuarios visitantes.

SGSN (Serving General Packet Radio Service)

Su funcionalidad es similar a la del MSC pero en este caso dirigida a servicios de conmutación de paquetes. El SGSN contiene información de ubicación, de suscripción, de la celda o área en la que el móvil está registrado, etc.

3.2.2.3 UTRAN

UMTS Terrestrial Radio Access Network es el nombre escogido para el subsistema radio del estándar UMTS, que permite la conexión entre los terminales móviles y el núcleo de red.

Está formada por un conjunto de subsistemas RNS (Radio Network Subsystem) conectados al CN a través de una interfaz Iu e interconectados entre sí a través de interfaces Iur. Cada RNS está constituido a su vez por un controlador RNC (Radio Network Controller) del que depende un conjunto de Nodos B.

RNC es el elemento de la red responsable del control de los recursos radio bajo su dominio, es decir, de los nodos B conectados a él. Se encarga del control de carga y congestión de sus celdas y también ejecuta el control de admisión para nuevos usuarios.

EL Nodo B tiene como principal función realizar las funciones propias de la capa física de UTRAN (codificación de canal, adaptación de tasa, ensanchamiento, etc.) que se verán más adelante. También se encarga de alguna función básica del manejo de los recursos radio como el control de potencia en bucle cerrado. El nodo B es el equivalente en UMTS de la estación base de GSM.

3.2.2.3.1 Capa física UTRAN: Recursos de la interfaz radio

Tramas temporales

A pesar de que la tecnología CDMA utilizada para ofrecer acceso múltiple en la interfaz radio, se ha definido un marco temporal para los enlaces ascendente y descendente. Cada Nodo-B tiene su propio reloj para la temporización de las tramas, lo que hace innecesaria la sincronización con fuentes de tiempo externas.

Dado que en los primeros despliegues de UMTS el servicio de voz continuaba siendo dominante, se estableció una duración de trama de 10ms. Este tiempo es reducido, lo que introduce un menor retardo y favorece la transmisión de servicios en tiempo real como la voz, Una trama de mayor duración permitiría una mayor profundidad de entrelazado y por tanto, una menor tasa de errores.

Cada trama se identifica con un valor numérico entre 0 y 4.095 denominado System Frame Number (SFN), y está compuesta por 15 ranuras de tiempo (Time Slots), numerados de 0 a 14, de duración 2/3 ms.

Por encima de la trama, encontramos la supertrama, formada por 72 tramas con una duración de 720ms, múltiplo de la supertrama MF26 de GSM.

En el enlace descendente, se multiplexa la información de usuario y de control dentro de cada intervalo. El factor de ensanchamiento puede tener distintos valores, variando la tasa binaria entre los 15 y los 900 kbit/s.

$$SF = \frac{512}{2^k} \quad 0 \leq k \leq 7$$

Tabla 3.1 – Tablas binarias del enlace descendente

	V_{chips}	$V_{\text{símbolo}}$	V_{bits}
Trama	38400	38400/SF	76800/SF
Intervalo	2560	2560/SF	5120/SF

En el enlace ascendente, cada intervalo ofrece dos campos de datos separados para la información de usuario y la información de control. El factor de ensanchamiento puede tener distintos valores, variando la tasa binaria entre los 15 y los 1.920 kbit/s.

En ambos enlaces, la elección de k permite configurar distintos tipos de intervalos. En caso de requerir mayores tasas de transferencia, puede realizarse una transmisión multicódigo.

Códigos

Para la transmisión de la señal en UMTS se realiza una doble codificación:

- Código ortogonal expansor que realiza la expansión en cada canal físico.

- Código de aleatorización (Scrambling Code).

Códigos ortogonales

Estos códigos se utilizan para separar las transmisiones en downlink de una única estación base en un solo sector y en uplink para separar los canales físicos dedicados de un terminal. Los códigos de ensanchamiento/canalización están basados en códigos ortogonales de factor de expansión variable OVSF que preservan la ortogonalidad entre los enlaces descendentes de diferentes factores de expansión.

La Figura 3.5 muestra la estructura arborescente según la cual se generan los OVSF. Cada nivel n del árbol define n códigos ortogonales de factor de expansión $SF=n$ que forman las n ramas de dicho nivel. De cada rama emergen dos: en la primera se duplican los chips de la rama origen y en la segunda se duplican cambiándolos de signo la segunda vez.

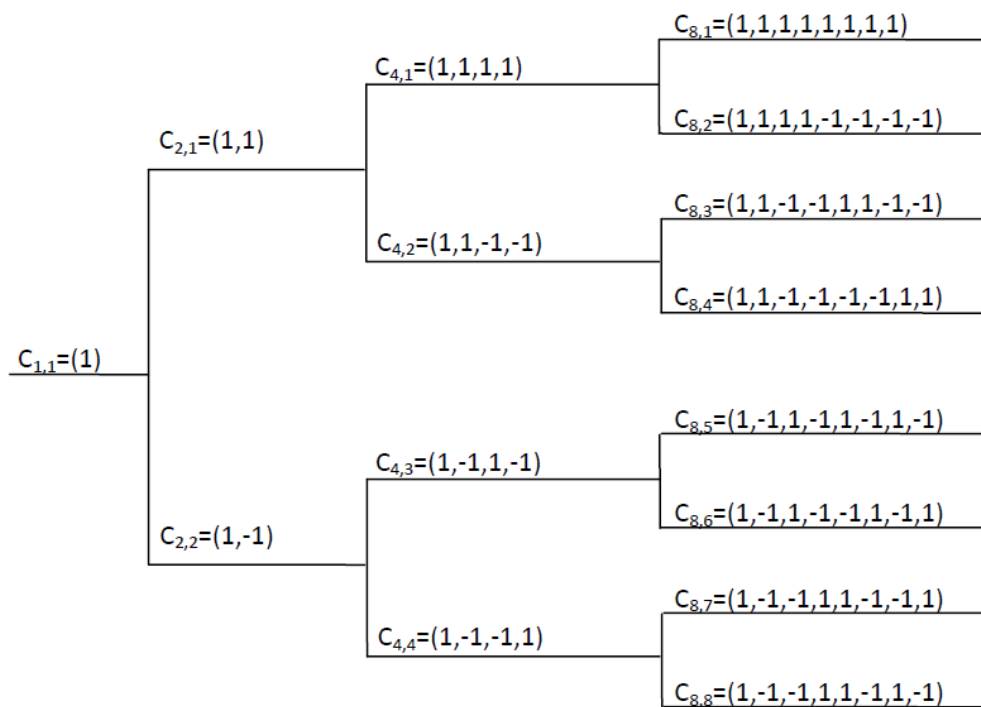


Figura 3.5 – Códigos ortogonales de factor de expansión variable OVSF

El número de códigos ortogonales es de 512 para el downlink y 256 para el uplink, pero en la práctica, el número de códigos utilizables es inferior. Si en una célula se está utilizando un código $c_{n,i}$ para un usuario y servicio, no puede usarse en la misma los progenitores ni los

descendientes. En consecuencia, el número de códigos utilizables en una célula no es fijo, sino que depende de los factores de expansión utilizados.

Códigos de aleatorización

Los códigos SC (Scrambling Code) no son ortogonales sino pseudoaleatorios (PN) y deben poseer las siguientes propiedades:

- Buenas características de autocorrelación para evitar errores de sincronización y permitir separar con facilidad las componentes del multitrayecto.
- Baja correlación cruzada para reducir la interferencia del multiacceso.
- Elevada cuasi-aleatoriedad para que la señal resultante se asemeje al ruido blanco gaussiano.

Los códigos de aleatorización se aplican a secuencias de chips en cuadratura y fase por lo que son valores complejos.

En el enlace descendente, los códigos SC permiten la reutilización de códigos ortogonales en una misma célula y la distinción entre las diferentes células de la red. Se han definido $2^{18}-1=262.143$ códigos de los que sólo se utilizarán una serie de 8.192 subdividida en 512 conjuntos de 16 códigos (uno primario y los otros 15 secundarios).

En el enlace ascendente, estos códigos establecen la distinción entre los diferentes usuarios cada uno de los cuales tiene asignado su propio SC. Se han definido $2^{24}=16.777.216$ códigos llamados códigos largos (38.400 chips) y otros tantos cortos (256 chips), todos diferentes de los del downlink.

Codificación de canal

Para la transmisión en UMTS se utilizan dos códigos de canal:

- Un código interno de bloque para detección de errores por CRC de 8, 12, 16 ó 24 bits.
- Un código externo para corrección de errores con distintas opciones:
 - o Códigos convolucionales de tasas $r=1/2$ ó $r=1/3$ y longitud $L=9$.
 - o Turbo-códigos con tasa $r=1/3$ para servicios que requieran tasas de errores de $BER < 10^{-6}$.

Los códigos de canal se aplican combinados con el entrelazado de bits con profundidades de 1, 2, 4 u 8 tramas (10, 20, 40 u 80 ms).

Los servicios en tiempo real utilizan la codificación FEC con corrección de errores en recepción. Los servicios que no requieren tiempo real usan una combinación de FEC y ARQ para el control de errores.

Modulación

La modulación utilizada en el enlace descendente es QPSK, utilizando filtros de premodulación en coseno alzado con un roll-off de $\alpha=0,22$.

En el enlace ascendente se utilizan dos modulaciones BPSK, una para el eje I y otra para el eje Q. Al igual que en el downlink, se utilizan filtros en coseno alzado con $\alpha=0,22$.

3.3 Tecnología WCDMA

3.3.1 Introducción

La tecnología W-CDMA (Wideband direct-sequence Code Division Multiple Access) como ya se ha comentado en el capítulo anterior es la interfaz radio más utilizada en los sistemas UMTS que se usa en Europa y Asia, incluyendo Japón, Corea y China. Hace uso de las bandas de frecuencia que el WARC-92 asignó para el sistema 3G IMT-2000 alrededor de la banda 2 GHz.

En este capítulo se describen las propiedades generales de esta tecnología cuya principal ventaja y que hace que sea una tecnología muy atractiva en entornos móviles es el uso que hace de técnicas de espectro ensanchado.

3.3.2 Espectro ensanchado

Los sistemas de espectro ensanchado son aquellos en los que el ancho de banda de las señales transmitidas es muy superior al mínimo necesario para transportar la información. Para este proceso es necesaria una secuencia de ensanchamiento o código, independiente de la señal de información y que debe ser conocida por el receptor para poder recuperarla.

A cambio de una mayor ocupación espectral, este tipo de sistemas presenta una serie de ventajas sobre los sistemas convencionales:

- Reducción de la densidad espectral de potencia
- Confidencialidad de la información transmitida gracias a los códigos pseudoaleatorios (multiplexación por división de código).
- Protección frente a interferencias
 - De banda estrecha
 - De banda ancha
- Elevada resolución temporal
- Protección frente al desvanecimiento multitrayecto

3.3.2.1 CDMA

Code Division Multiple Access (CDMA) es un término genérico para varios métodos de multiplexación del medio basados en la tecnología de espectro expandido. Las señales se transmiten simultáneamente en el mismo canal utilizando distintos códigos ortogonales y pueden separarse en el receptor gracias a las propiedades de ensanchamiento espectral.

Respecto a las técnicas clásicas de multiplexación basadas en frecuencia (FDMA) o en tiempo (TDMA), el acceso CDMA se beneficia de la mejor adaptación de las señales de espectro ensanchado a los entornos en los que se despliegan este tipo de redes.

Existen distintas variantes de CDMA en función de la técnica de espectro ensanchado utilizada:

- Frequency Hopping (FH), en las que la frecuencia de la portadora cambia en el tiempo según un patrón establecido.

- Time Hopping (TH), en las que el intervalo de transmisión dentro de una estructura de trama temporal cambia según un patrón establecido.

- Direct Sequence (DS), en las que la secuencia original se multiplica por una secuencia de chips de mucha mayor velocidad.

- Multicarrier, en las que se genera un conjunto de chips a partir de cada símbolo, cada uno de los cuales modula a una subportadora diferente.

De todas ellas, la modalidad de Secuencia Directa (DS) es la más habitual en sistemas de comunicaciones móviles y es la utilizada en los métodos de acceso W-CDMA.

3.3.2.2 DS-CDMA

Una de las posibles formas de realizar la expansión espectral consiste en la multiplicación directa de la señal de información $d(t)$ y el código de expansión $c(t)$.

La señal resultante de la multiplicación $v(t)$ se aplica a un modulador a cuya salida se obtiene la señal RF, $s(t)$.

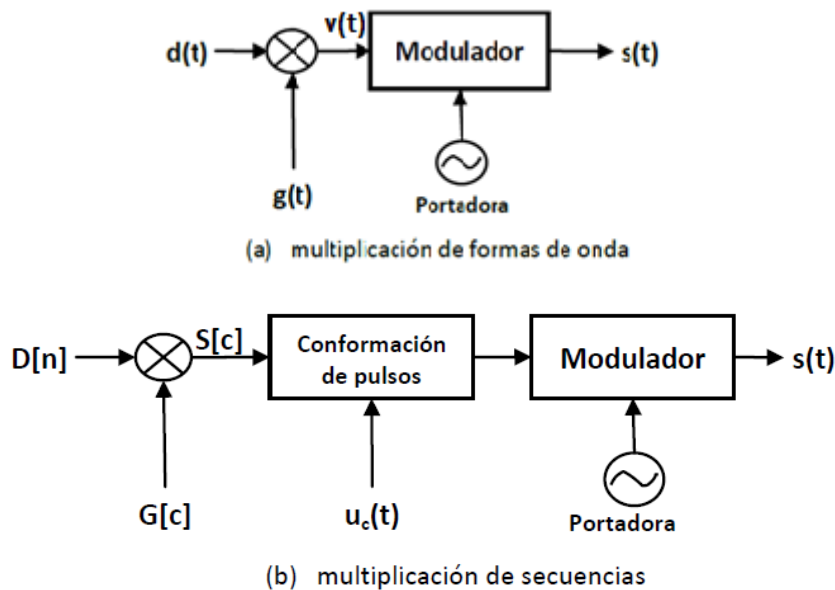


Figura 3.6 – Modulación DSSS

El código es una señal digital con una velocidad binaria muy superior a la de la señal de información para realizar su expansión. A los símbolos de $c(t)$ se les denomina chips para distinguirlos de los bits de $d(t)$.

En el estándar de comunicaciones móviles objeto de este estudio, la secuencia de código es de tipo pseudoaleatorios o pseudoruido PN. Una secuencia PN es una sucesión de bits (+1,-1) que se repite con período muy grande y que tiene propiedades similares a las de una secuencia aleatoria incorrelada de media nula, esto es, ruido blanco.

Sean

- $D[m]$ la secuencia de bits de datos con velocidad $v_b = 1/T_b$
- $C[n]$ la secuencia de chips de código con velocidad $v_c = 1/T_c = Nv_b$

Las señales de datos y de código se representan como:

$$d(t) = d(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D[m] u_b(t - mT_b) \quad (3.1)$$

$$c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C[n] u_c(t - nT_c) \quad (3.2)$$

Siendo u_b y u_c impulsos con código NRZ (non return to zero) de amplitud unidad y duraciones T_b y T_c respectivamente. El coeficiente entero N se denomina factor de expansión.

La secuencia ensanchada $V[n]$ se obtiene como:

$$V[n] = C[n] D\left[\frac{n}{N}\right] \quad (3.3)$$

La señal en banda base $v(t)$:

$$v(t) = c(t)d(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} V[n] u_c(t - nT_c) \quad (3.4)$$

Sobre esta señal $v(t)$ se realiza normalmente una modulación de canal IQ resultando la señal $s(t)$ que es finalmente transmitida.

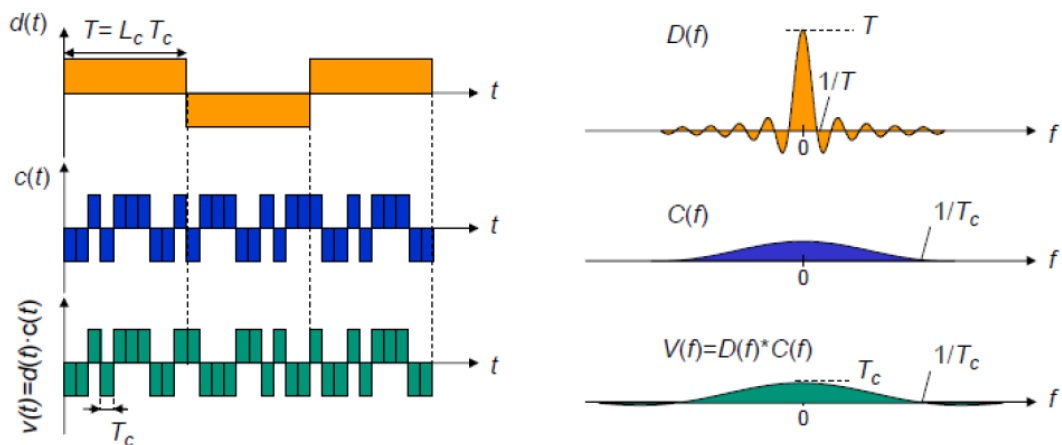
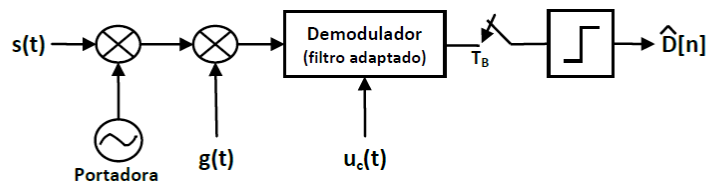


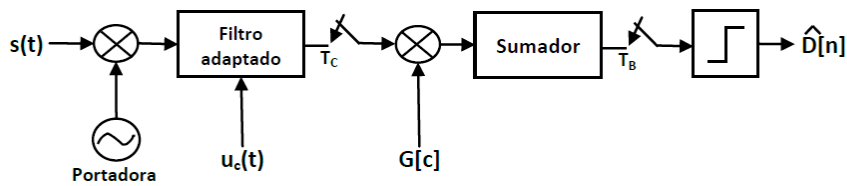
Figura 3.7 – Modulación DSSS

En recepción, después de la demodulación si hubo una modulación previa, la señal $r(t)$ se multiplica de nuevo por una copia sincronizada de la señal de código $c(t)$, obteniendo nuevamente la señal $d(t)$. La Figura 3.8 muestra la demodulación de la señal y la Figura 3.9 la transmisión y recepción de este tipo de señales.

$$r(t)c(t) = v(t)c(t) = d(t)c(t)d(t) = d(t) \tag{3.5}$$



(a) multiplicación de formas de onda



(b) multiplicación de secuencias

Figura 3.8 – Demodulación DSSS

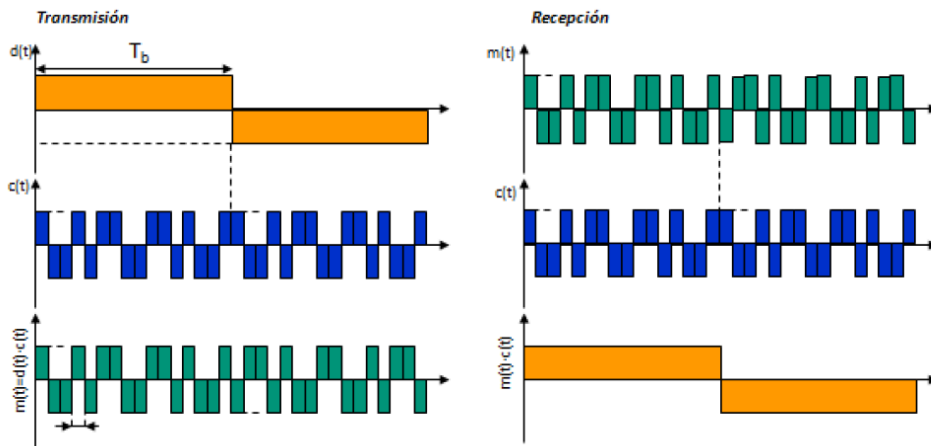


Figura 3.9 – Transmisión/Recepción DSSS

3.3.3 W-CDMA

Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) es una técnica de acceso múltiple por código CDMA basada en la modalidad Direct Sequence que constituye la base del sistema UMTS de tercera generación.

W-CDMA fue desarrollado a finales de los años 90 por el operador japonés NTT-DoCommo como interfaz aire para FOMA, su red de 3ª generación. Esta propuesta fue aceptada por la ITU como parte de IMT2000, como alternativa a CDMA2000.

Las principales características de este interfaz radio se resumen a continuación:

- WCDMA consiste en el ensanchamiento de la señal de información mediante la multiplicación de esta por secuencias de bits cuasi-aleatorias llamadas chips derivadas de los códigos de ensanchamiento de CDMA. Para soportar altas tasas de bit (por encima de 2 Mbps), es necesario que la tecnología permita tener un factor de ensanchamiento variable y conexiones multicódigo.

Un ejemplo de la disposición de estos sistemas en frecuencia, tiempo y código se muestra en la Figura 3.10.

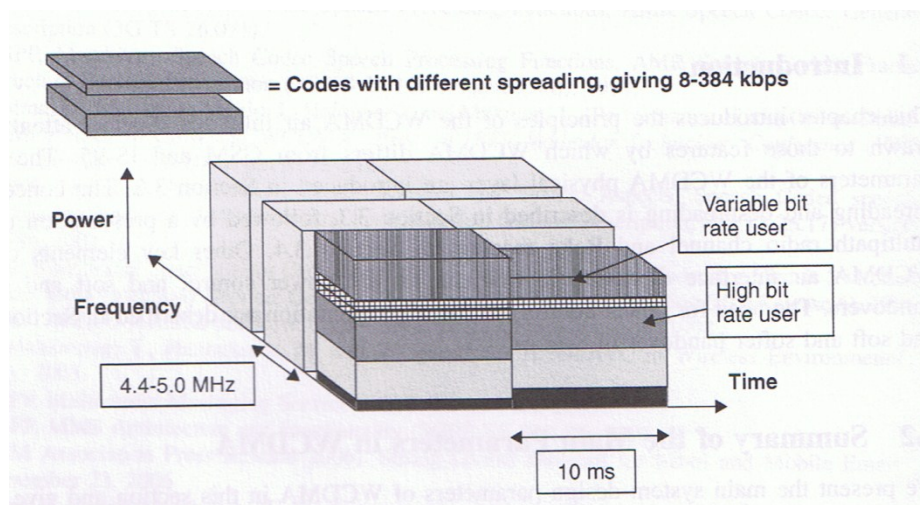


Figura 3.10 – Asignación del ancho de banda en sistemas WCDMA

- La tasa de chip de 3.84 Mcps nos conduce a un ancho de banda de portadora de aproximadamente 5 MHz. Sistemas DS-SS-CDMA con un ancho de banda de aproximadamente un 1 MHz, como IS-95, son conocidos comúnmente como sistemas CDMA de banda estrecha. De la comparación con estos sistemas surge el término *wideband* para designar a este tipo de sistemas con un ancho de banda de portadora mayor que permite soportar altas tasas de transmisión.
- Los operadores de red, siempre sujetos a su licencia de espectro, pueden desplegar múltiples portadoras de 5MHz para incrementar la capacidad. El actual espacio entre portadoras es de unos 200 KHz entre aproximadamente 4.4 y 5 MHz, dependiendo de la interferencia entre portadoras. La Figura 3.10 muestra también esta disposición en frecuencia.
- WCDMA soporta tasas de datos variables lo que se puede traducir en que el concepto de ancho de banda bajo demanda se hace efectivo. La tasa de datos de usuarios se mantiene

constante durante cada trama de 10 ms. Sin embargo, la capacidad de datos entre usuarios puede variar trama a trama.

- WCDMA soporta dos modos básicos de operación: Frequency Division Duplex (FDD) y Time Division Duplex (TDD). En el modo FDD, se usan portadoras con distinta frecuencia para el enlace ascendente y descendente, sin embargo, en TDD se usa una única portadora de 5 MHz para los dos enlaces compartida en el tiempo.
- WCDMA soporta estaciones bases asíncronas, a diferencia del sistema síncrono IS-95 que necesitaba de una referencia global de tiempo como GPS. Esto hace que el despliegue en interiores y micro estaciones base sea más fácil cuando no se necesita la recepción de una señal GPS.
- WCDMA emplea detección coherente tanto en uplink como en downlink basada en el uso de símbolos de piloto o de un piloto común. Mientras que en los sistemas IS-95 ya se usaba en el enlace descendente, el uso en el uplink es nuevo en los sistemas CDMA y resulta en un aumento en la capacidad y cobertura del enlace ascendente.
- WCDMA incluye algunos conceptos como la detección multiusuario y el uso de antena inteligentes adaptativas que mejoran la recepción de las señales que permiten mejorar la capacidad y/o la cobertura.
- WCDMA fue diseñado para ser compatible con los sistemas GSM ya implantados. Por tanto, los trasposos entre GSM y WCDMA son soportados por la red.

3.3.3.1 Compartición automática de carga

Los sistemas limitados por interferencia permiten compartir los recursos radioeléctricos entre las células de una manera automática y mucho más eficiente.

En sistemas limitados por dimensiones la asignación de canales para cada célula es rígida. Si una célula o sector tiene todos sus canales ocupados, cualquier intento de conexión será rechazado aunque existan canales libres en células vecinas.

En los limitados por interferencia, el número de canales de una célula no es fijo, sino que depende de la carga de las células vecinas. En la práctica, esto supone que las células que soportan mayor carga disminuyen su cobertura, cediendo parte de su carga. Este compromiso entre capacidad y cobertura de la célula se conoce con el nombre de Cell Breathing.

Los sistemas celulares pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Limitados por dimensiones, basados en dividir el espectro disponible en canales ortogonales. Dada la limitación de canales ortogonales, será necesario reutilizar estos canales agrupando células en *clústeres* de forma que las células cocanal estén lo suficientemente alejadas. Pertenecen a esta categoría los sistemas FDMA y TDMA y los sistemas CDMA basados en códigos ortogonales. La capacidad está limitada por el número de canales por célula. Esta limitación es rígida.
- Limitados por interferencia, en los que se establece un conjunto prácticamente ilimitado de canales no ortogonales lo que hace innecesaria la reutilización. El número máximo de conexiones simultáneas vendrá limitado por el nivel de interferencia admisible. Pertenecen a esta categoría los sistemas CDMA con secuencias pseudoaleatorias (PN).

En general, los sistemas limitados por interferencia se adaptan de forma natural a condiciones cambiantes de interferencia, sin necesidad de técnicas de asignación dinámica de canales.

Los estándares de comunicaciones móviles CDMA se basan en el empleo de secuencias PN, combinando su utilización con secuencias ortogonales lo que supone una pequeña mejora adicional ya que se consiguen las ventajas de la limitación por interferencia con la mejora añadida de que se elimina parte de la interferencia (la de las señales de la propia célula), por ortogonalidad parcial.

3.3.3.2 Receptor Rake: Protección frente a desvanecimientos por multitrayecto

La propagación radio en entornos móviles está caracterizada por las múltiples reflexiones, difracciones y atenuaciones que sufre la señal. Esto se debe a la existencia de múltiples obstáculos entre el emisor y el receptor y es lo que se conoce como propagación multicamino.

El receptor Rake se aprovecha de esta característica del enlace detectando cada una de las componentes multitrayecto y realiza una combinación óptima de las mismas. De este modo, el receptor Rake puede interpretarse como un filtro adaptado a la señal recibida que debe ajustarse a la forma de canal (estimación de canal) capaz de detectar componentes multitrayecto separadas al menos un período de chip. Así para secuencias de 3.84 Mcps el

período de chip es de 0.26 us, por tanto componentes multicamino separadas al menos 0.26us podrán ser detectadas por el receptor WCDMA y combinadas coherentemente. Los 0.26 μs de retraso se obtienen con una distancia entre emisor y receptor de 78 m (=velocidad de la luz/ tasa de chip = $3 \cdot 10^8 / 3.84 \text{ Mcps}$). Por tanto, es fácil ver que los sistemas WCDMA son aptos para sistemas de células pequeñas, objeto de estudio de este proyecto. Por tanto, con este sistema en recepción que mitiga los efectos negativos del multitrayecto se mejora la calidad de las señales recibidas lo que se traduce en un aumento de la capacidad y/o cobertura.

3.3.3.3 Control de potencia

El control rápido de potencia es quizás el aspecto más importante en sistemas WCDMA debido al problema cerca- lejos (*near-far*) que existe en estos sistemas:

Enlace ascendente: diferente atenuación de las señales. Las señales de los distintos usuarios móviles llegaran con niveles de potencia diferentes a la estación base, pudiendo los usuarios más cercanos bloquear a otros más alejados de la estación base.

Enlace descendente: diferente nivel de las señales de la célula debido a la interferencia externa y al ruido térmico. Habrá que tener especial cuidado con los usuarios que se encuentren en el borde de la célula que sufrirán una mayor interferencia inter-celular.

El control de potencia debe ser dinámico con una actualización periódica, por lo que las órdenes deben multiplexarse en el tiempo con la información. En sistemas WCDMA se usan tres sistemas para el control de potencia:

Control de potencia en bucle abierto:

Se basa en estimar la atenuación del enlace descendente mediante el nivel señal recibido (canal piloto) y suponer dicha estimación válida para el ajuste inicial de la potencia de transmisión del enlace ascendente. En FDD esta suposición es válida para la pérdida media de propagación y no para la atenuación instantánea debido a la separación existente entre las bandas de frecuencia para el enlace descendente y ascendente.

Control de potencia en bucle cerrado:

Se usa para el control de desvanecimientos rápidos (1ms) y se basa en un proceso de realimentación negativa: el receptor mide un cierto parámetro, compara con el valor objetivo y ordena aumentar o reducir la potencia al extremo transmisor.

El parámetro medido puede ser:

- Nivel de señal recibido
- Relación señal/interferencia

El segundo es más efectivo ya que tiene en cuenta las variaciones de la interferencia pero también es más complejo.

La medida del parámetro se hace 1500 veces por segundo (1.5 KHz) para cada usuario móvil y opera mucho más rápido que cualquier cambio significativo que pudiera ocurrir en las pérdidas del enlace e incluso más rápido que las variaciones por desvanecimiento rápido Rayleigh para velocidades bajas a moderadas de los usuarios.

Control de potencia en bucle externo:

A pesar del bucle cerrado, la E_b/N_0 instantánea sufre variaciones rápidas. Esto se debe a que dicho bucle no es ideal (retardo, paso fijo, errores): no compensa exactamente el efecto de multitrayecto. Para unas condiciones dadas de propagación dadas, una cierta calidad (BLER) objetivo se corresponde con un cierto valor medio de la relación E_b/N_0 . Una misma calidad (BLER) objetivo puede requerir diferentes E_b/N_0 medias, en función de las condiciones de propagación. Las fluctuaciones serán mayores cuanto mayor sea la velocidad del móvil. De lo anterior surge la necesidad de controlar la E_b/N_0 media del enlace. El control se lleva a cabo modificando el valor de referencia del control en bucle cerrado. Se basa en una realimentación negativa en la que el parámetro medido es la calidad (BLER) y el parámetro sobre el que se actúa es la E_b/N_0 de referencia del bucle cerrado. La frecuencia de actualización en este caso (10-100 Hz) es mucho menor que para el bucle cerrado ya que las variaciones que debe compensar son relativamente pequeñas.

3.3.3.4 Traspaso con continuidad

Los sistemas celulares CDMA posibilitan un método de traspaso denominado soft hand-off ó traspaso con continuidad, más fiable que el utilizado en los sistemas clásicos.

En FDMA y TDMA, cuando un terminal se mueva a la zona de cobertura de una célula contigua no puede continuar usando el canal (subportadora y/o time slot) que tenía asignado ya que los canales disponibles en la célula vecina son distintos. La red deberá asignar un canal

en la nueva célula y el informar al UE de que debe abandonar el canal que estaba utilizando y sintonizar el nuevo (break-before-make).

En CDMA, por el contrario, puede establecerse el nuevo enlace antes de abandonar el antiguo, manteniendo ambos durante un tiempo (*make-before-break*) y quedando el móvil asignado a una única estación base al finalizar el proceso. En este método de traspaso, que puede generalizarse para más de dos estaciones base, cada una de las estaciones mantienen contacto con el terminal hasta que ya no se considere necesario.

El traspaso con continuidad contribuye a mejorar la calidad e integridad de las llamadas y a reducir el nivel de interferencia en el enlace ascendente. Como contrapartida, puede incrementar la interferencia en el enlace descendente.

3.3.3.5 Actividad discontinua de fuente

En los sistemas limitados por interferencia, la reducción de esta se traduce directamente en un aumento de la capacidad. La actividad discontinua de fuente permite, además de incrementar la duración de la batería del terminal, reducir la potencia de transmisión durante los periodos de inactividad, lo que contribuye a la disminución del nivel global de interferencia.

Una aplicación de esta idea se encuentra en la función de transmisión discontinua (DTX) que incorporan los codificadores de voz en UMTS que hace que el factor de utilización del servicio de voz no sea 1 sino 0.66.

Si bien los sistemas limitados por dimensiones también pueden aprovecharse de estas técnicas para reducir el nivel de interferencia, la disminución sería mucho menos efectiva dado el reducido número de fuentes interferentes.

3.3.3.6 Codificación de muy baja tasa

En un sistema clásico de banda estrecha, una codificación de canal de tasa r aumenta la velocidad de transmisión en el canal, lo que aumenta el ancho de banda necesario en un factor $1/r$.

En un sistema de espectro ensanchado, las características espectrales de la señal ensanchada son independientes de las de la señal antes de ensanchar, lo que permite utilizar mecanismos de codificación de canal de tasa muy baja.

Dentro de W-CDMA, el empleo de DS-SS permite la utilización de técnicas de codificación de canal mucho más potentes que las utilizadas en sistemas tradicionales.

En los sistemas de comunicaciones móviles digitales, lo habitual es utilizar un código detector de errores de bloque y un código corrector de tipo convolucional. En UMTS se emplean, además de CRC, códigos convolucionales de tasa 1/2 ó 1/3 o turbo-códigos de tasa.

CAPÍTULO 4

4 Modelos de propagación y Cálculo de la capacidad

4.1 Introducción

En este capítulo se muestra una visión general de los modelos de propagación y parámetros de simulación utilizados durante el proyecto que nos han permitido caracterizar los escenarios bajo estudio.

En el estudio del despliegue en interiores de femtoceldas hay que tener especial cuidado con la gestión de interferencias ya que las femtoceldas hacen uso del espectro radioeléctrico de la red móvil. Esto significa que existirá interferencia entre femtoceldas y macroceldas cercanas si ambas hacen uso de la misma frecuencia. Esto ocurre porque se espera que las femtoceldas sean instaladas por el usuario en cualquier punto del edificio sin realizar una planificación previa como en el caso de la instalación de estaciones base macroceldas.

En este capítulo se busca estudiar el comportamiento del sistema en el que coexistan femtoceldas y macroceldas utilizando la misma banda de frecuencias o no. Es decir, el estudio del despliegue de femtoceldas con canal dedicado o canal compartido.

4.2 Modelo de propagación en interiores

La propagación en interiores difiere de la comunicación radio tradicional en que la distancia de radio de cobertura es mucho menor y la variación en el entorno de trabajo es mayor con un pequeño cambio de posición. Esto es debido a la influencia que tienen las fachadas y paredes, los materiales usados, la forma del edificio y el tipo.

En este proyecto al tratarse de escenarios de propagación en interiores deberemos tener especial cuidado en estudiar las características de los edificios/hogares donde se quiera instalar la femtocelda así como el entorno que la va a rodear y sus características.

➤ Modelo multipared (*Multi-Wall Model*)

El modelo de propagación utilizado para el cálculo de la capacidad en edificios que hacen uso de femtoceldas ha sido el modelo multipared (*Multi-wall model*) utilizado en interiores. Este modelo considera la pérdida en espacio libre (LOS) más las pérdidas introducidas por las paredes y plantas. La pérdida introducida por el número de plantas que se atraviesan en la comunicación no es una función lineal y viene determinada por un factor b :

$$L_p(dB) = L_{FS} + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left[\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right] L_f \quad (4.1)$$

Donde:

- L_{FS} son las pérdidas en el espacio libre entre transmisor y receptor:

$$L_{FS} (dB) = L_b + 20\log_{10}(d)_m \quad (4.2)$$

Donde:

- d es la distancia entre transmisor y receptor en m
- L_b son las pérdidas a una distancia de referencia dada d_b que suele ser de 1m.

$$L_b (dB) = 20\log_{10} \left(\frac{4\pi d_b}{\lambda} \right) \quad (4.3)$$

- K_{wi} es el número de paredes atravesadas.
- K_f es el número de plantas distantes
- L_{wi} es la pérdida por la pared tipo i
- L_f es la pérdida entre plantas consecutivas
- b es un parámetro empírico con un valor óptimo de 0.46
- i es el número de tipos de paredes

4.3 Modelos de propagación en exteriores

En este proyecto además de tener en cuenta la propagación en el interior de los edificios también necesitamos calcular las pérdidas de propagación en exteriores para los escenarios en los que tengamos en cuenta el efecto de estaciones base macrocelda en nuestro entorno que utilicen la misma frecuencia que nuestra femtocelda.

➤ **Modelo Hata-COST231**

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

La expresión de las pérdidas de propagación viene dada por:

$$L_b(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t) \log_{10} d + c_m) \quad (4.4)$$

Donde:

- $d(\text{km})$: distancia del enlace en Km
- $f(\text{MHz})$: frecuencia en MHz
- $h_t(\text{m})$: altura de la estación base en m
- $h_r(\text{m})$: altura del móvil en m
- $a(h_r)$ es el factor de corrección por la altura del móvil si $h_r \neq 1.5 \text{ m}$

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

Ciudad pequeña-mediana:

$$a(h_r) = (1.1 \log_{10} f - 0.7)h_r - (1.56 \log_{10} f - 0.8) \quad (4.5)$$

Ciudad grande:

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10} 11.75h_r)^2 - 4.97 \quad (4.6)$$

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

$$C_m(dB) = \begin{cases} 0 & \text{para ciudad pequeña - mediana} \\ 3 & \text{para ciudad grande} \end{cases} \quad (4.7)$$

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

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

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

4.4 Desvanecimiento por sombra

En los modelos de propagación explicados en el apartado anterior no se tiene en cuenta aspectos aleatorios en la propagación como puede ser el desvanecimiento por sombra de obstáculos que hacen que sea necesario introducir un término aleatorio en la atenuación de propagación. Teórica y experimentalmente se deduce que este término tiene una distribución Gaussiana en dB (log-normal en unidades naturales) con media nula y desviación típica σ que dependerá del entorno y del modelo de cálculo utilizado para la pérdida de propagación.

$$L_{b_{real}} = L_{b_{modelo}} + \chi_{\sigma} \quad (4.8)$$

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

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

$$\chi_{\sigma}(h_r) = (\chi_{\sigma}@0\text{ m}) * \left(1 - \frac{h_r}{h_t}\right)^n \quad (4.9)$$

Donde $(\chi_{\sigma}@0\text{ m}) = 1.28\sigma$

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

4.5 Cálculo de la capacidad de femtoceldas con canal dedicado.

En este apartado se va a considerar que todos los puntos de acceso femtocelda desplegados en los escenarios que a continuación se detallan tendrán asignado un canal dedicado, es decir, no lo compartirán con el resto de la red móvil cercana. Esto significa que la interferencia sobre el resto de sistemas de la red como macroceldas, microceldas, etc. será mínima.

4.5.1 Análisis para el enlace ascendente

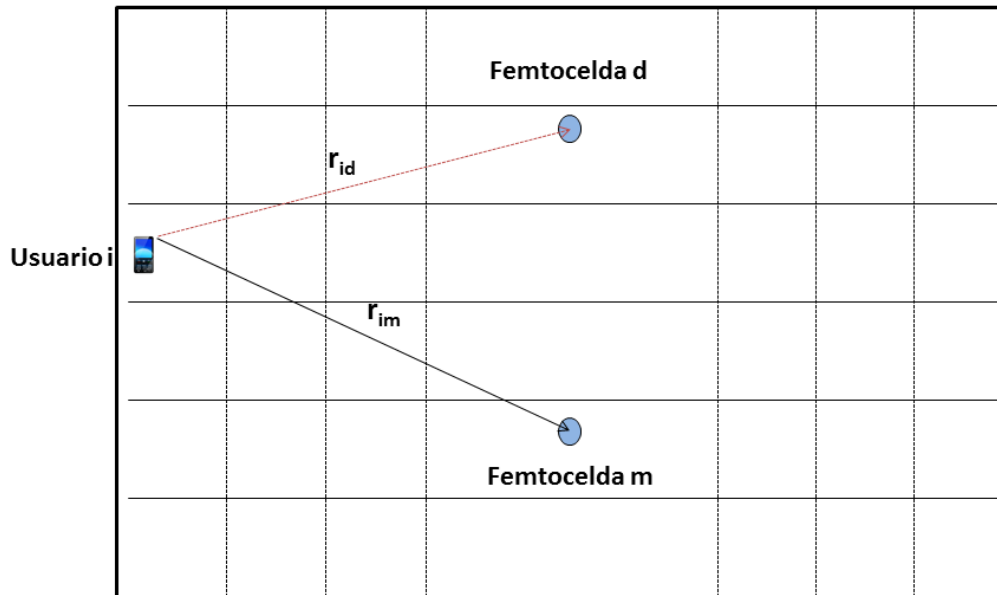


Figura 4.1 – Análisis de la interferencia en uplink

Si el usuario interferente i se encuentra a una distancia r_{im} de su femtocelda y a una distancia r_{id} de la estación base femtocelda de referencia como se muestra en la Figura 4.1, el factor de interferencia intercelular $L(r_{id}, r_{im})$ debido a la distancia y las pérdidas de propagación vendrá dado por:

$$L(r_{id}, r_{im}) = 10^{(L_{im} - L_{id})/10} \quad (4.10)$$

Donde:

- L_{im} son las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda m .
- L_{id} son las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda d .

Por otro lado si tenemos en cuenta además de la distancia y las pérdidas de propagación el efecto del desvanecimiento por sombra, el factor de relación de la interferencia viene dado por:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} L(r_{id}, r_{im}) \quad (4.11)$$

Donde $\xi_{id} = \xi_{im} = \xi$ son las variables aleatorias Gaussianas de media cero y desviaciones típicas

$$\sigma_{id} = \sigma_{im} = \sigma_{sh}$$

El valor medio de la potencia de señal recibida por femtocelda para un servicio dado s es $P_{r,s}$. El valor medio de la potencia de interferencia de un usuario activo comunicándose con la estación base de la femtocelda de referencia d asumiendo el mismo servicio será también $P_{r,s}$. Un usuario i no se comunicará con la estación base de la femtocelda de referencia d pero sí con la estación base de la femtocelda m cuando las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda m sean menores que las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda d , es decir si $\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = 1$, donde:

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = \begin{cases} 1, & \text{si } L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, & \text{en el resto de casos} \end{cases} \quad (4.12)$$

Para analizar la capacidad en el enlace ascendente hay que tener en cuenta tanto la interferencia intracelular (entre usuarios de la misma femtocelda) como la interferencia intercelular (entre usuarios de distintas femtoceldas). Para ver el efecto de ambas se ha calculado la esperanza y varianza de la potencia de interferencia.

4.5.1.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Asumiendo que cada femtocelda tiene una capacidad de $N_{u,s}$ usuarios del servicio s , el valor esperado para la potencia de interferencia intracelular viene dado por la siguiente expresión:

$$E[P_{intra}]_s = P_{r,s} \alpha_s (N_{u,s} - k) \quad (4.13)$$

Donde

- $P_{r,s}$ es la potencia (media) recibida del servicio s por la estación base
- α_s es el factor de actividad del usuario del servicio s (0.66 para voz y 1.0 para usuarios de datos).
- $N_{u,s}$ es el número total de usuarios del servicio s
- $k = 1$ si el servicio s es el de estudio
- $k = 0$ si el servicio s no es el de estudio

Por otro lado, el valor esperado de la interferencia intercelular para un servicio dado s viene dado por la siguiente expresión:

$$E[I_{inter}]_s = \alpha_s \sum_{n=1}^{N_{u,s}} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \quad (4.14)$$

Donde $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$ modela el efecto de shadowing y está definido por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right] \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left(\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left\{\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right\}\right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Donde:

- $\beta = (\ln 10)/10$
- Utilizaremos σ^2 como valor general para la desviación típica de las variables aleatorias que representan el efecto shadowing. Para su cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

- $\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2$ si las desviaciones típicas de las dos femtoceldas no son iguales.
- $\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_{sh}^2$ si las desviaciones típicas de las dos femtoceldas son iguales ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{sh}$)

Siendo C_{dm} el coeficiente de correlación de sombra entre femtoceldas.

- Q es la función Gaussiana dada por:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (4.16)$$

Con todo esto el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular para el servicio s vendrá dado por la siguiente expresión:

$$E[P_{inter}]_s = P_{r,s} E[I_{inter}]_s \quad (4.17)$$

Teniendo en cuenta un control de potencia imperfecto con una desviación de error estándar de σ_c (dB), el valor esperado total de potencia de interferencia para el servicio s será:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2 / 2} (E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s) \quad (4.18)$$

El valor esperado de la potencia total de interferencia debido a todos los servicios será:

$$E[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^S E[P_{intf}]_{t,s} \quad (4.19)$$

Donde S es el número de servicios soportados por el sistema.

4.5.1.2 Varianza de la potencia de interferencia para los servicios de voz y datos

La varianza de la potencia de interferencia intracelular del servicio s se calcula como:

$$Var[P_{intra}]_s = (N_{u,s} - k) P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (4.20)$$

Donde:

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad q = e^{\beta^2 \sigma_c^2}$$

Por otro lado la varianza de la potencia de interferencia intercelular debida a una femtocelda interferente se calcula como:

$$Var[P_{inter}]_s = P_{r,s}^2 \sum_i^N [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q\alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \quad (4.21)$$

Donde:

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{2(\beta\sigma)^2} Q \left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left\{ \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right\} \right] \quad (4.22)$$

Por tanto, la varianza total de potencia de interferencia para el servicio s vendrá dada por la suma de las dos anteriores:

$$Var[P_{intf}]_s = Var[P_{intra}]_s + Var[P_{inter}]_s \quad (4.23)$$

Y la varianza de la potencia total de interferencia debida a todos los servicios será:

$$Var[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^S Var[P_{intf}]_{t,s} \quad (4.24)$$

4.5.1.3 Capacidad de la femtocelda para los servicios de voz y datos

Con las expresiones anteriores que nos permiten calcular los estadísticos de la potencia de interferencia podemos calcular para una probabilidad de bloqueo dada, la relación señal a interferencia $\left[\frac{C}{I}\right]_s$ para el servicio s como:

$$\left[\frac{C}{I}\right]_s = \frac{P_{r,s}}{P_N + E[P_{intf}]_s + Q^{-1}(\alpha)\sqrt{Var[P_{intf}]_s}} \quad (4.25)$$

Donde P_N es la potencia de ruido en el receptor y $Q^{-1}(\alpha)$ es un factor que depende de la probabilidad de bloqueo (2.05 para una probabilidad de 2% y 2.33 para una probabilidad del 1%). En el denominador de (4.25), el primer término representa el ruido mientras que el segundo y tercer término representan la interferencia.

Para un servicio dado la relación $\left[\frac{E_b}{N_0}\right]_s$ vendrá dada por:

$$\left[\frac{E_b}{N_0}\right]_s = \left[\frac{C}{I}\right]_s G_{p,s} \quad (4.26)$$

Donde:

- $G_{p,s} = \frac{W}{R}$ es la ganancia de procesamiento del servicio s

W es el ancho de banda en Hz o también llamado tasa de chip (Chip Rate) que en sistemas WCDMA es igual a 3.84 MHz.

R es la tasa de bit (Bit Rate) en bits/s que dependerá del servicio.

Asumiendo un número dado de usuarios para cada servicio, la relación probabilidad de bloqueo contra el número de usuarios puede obtenerse usando las ecuaciones (4.25) y (4.26).

Para el servicio conjunto de voz y datos, la relación entre la potencia máxima de transmisión de datos y la potencia máxima de transmisión para usuarios de voz dada en dB debería ser:

$$\left(\frac{P_{td}}{P_{tv}}\right)_{dB} = (1 + \delta) \left[10 \log_{10} \left(\frac{G_{pv}/\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_v}{G_{pd}/\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d} \right) \right] \quad (4.27)$$

Donde:

- P_{td} es la potencia de transmisión de los usuarios de datos en el borde de la femtocelda (máxima).
- P_{tv} es la potencia de transmisión de los usuarios de voz en el borde de la femtocelda (máxima).
- δ es una constante con un valor de 0.0 si solo se considera el valor medio de interferencia. Cuando la varianza de interferencia también se tiene en cuenta tomará un valor -0.1 a 0.1 dependiendo de los parámetros de los servicios bajo estudio.
- G_{pv} es la ganancia de procesamiento para servicio de voz
- G_{pd} es la ganancia de procesamiento para servicio de datos
- $(E_b/N_0)_v$ es el valor requerido para (E_b/N_0) para el servicio de voz en números reales.
- $(E_b/N_0)_d$ es el valor requerido para (E_b/N_0) para el servicio de datos en números reales.

4.5.2 Análisis para el enlace descendente

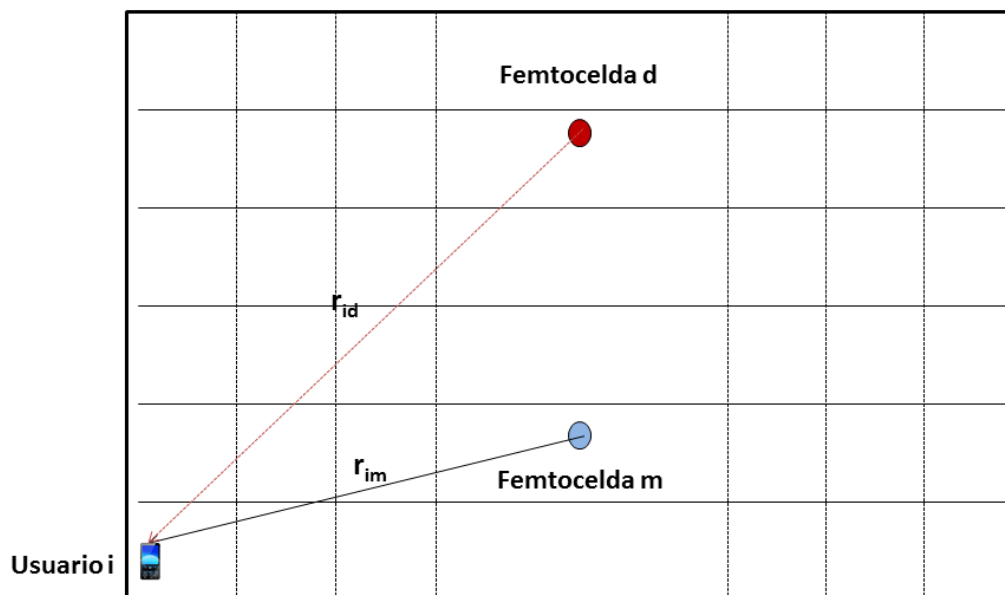


Figura 4.2 – Análisis de interferencia para enlace descendente

Para el cálculo de la capacidad downlink primero debemos calcular la potencia transmitida por la femtocelda (círculo azul).

Para calcular la potencia transmitida por el punto de acceso femtocelda se busca una aproximación a partir de la potencia transmitida por las macroceldas. Por tanto, si la potencia transmitida por una macrocelda suele ser de 43 dBm (20 W) y sabiendo también que para microceldas se usa una décima parte de ésta, tomaremos para el caso de femtoceldas un valor 100 veces menor. Así la potencia transmitida femtocelda será de 200mW (23 dBm).

Por otro lado, para los cálculos de la capacidad se considera que esta potencia se distribuye a los usuarios femtocelda de la siguiente manera:

EL 10% se reserva para transmitir el piloto:

$$Piloto = 0.1P_{tx_femto_total} \quad (4.28)$$

El 90% restante se transmite a los usuarios:

$$P_{tx_femto} = \left(1 - \frac{Piloto}{P_{tx_femto_total}}\right) P_{tx_femto_total} \quad (4.29)$$

4.5.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Se calcula la esperanza de interferencia intra tomando como referencia el usuario con mayores pérdidas dentro de la femtocelda m ya que será la peor situación en la que nos podamos encontrar. Este será el usuario i que aparece en la Figura 4.2.

Para obtener una aproximación de la interferencia intra, sumamos las pérdidas de todos los usuarios de la femtocelda y las normalizamos a la pérdida máxima (la del peor usuario). Así, obtenemos un factor de proporción entre pérdidas totales y la máxima de ellas que viene dado por la siguiente expresión:

$$A = \frac{1}{l_{p_max}} \sum l_i \quad (4.30)$$

El valor esperado de la potencia de interferencia intracelular del resto de usuarios sobre el peor de ellos será igual a:

$$E[P_{intra}] = (1 - \varphi) \frac{\left(P_{piloto} + P_{tx_{femto}} \frac{(A - 1)}{A} \right)}{l_{p_{max}}} \quad (4.31)$$

Donde:

- $l_{p_{max}}$ son las pérdidas de la señal del usuario más alejado dentro de la femtocelda.
- φ es el factor de ortogonalidad que dependerá de las condiciones de multitrayecto.

Con códigos totalmente ortogonales y sin multitrayecto $\varphi = 1$ y no existiría

interferencia de la femtocelda servidora. φ tomará un valor comprendido entre 0.8 y

0.9.

Para el cálculo del valor esperado para la potencia de interferencia intercelular se considera que al peor usuario de la femtocelda bajo estudio (usuario i) le llega el total de la potencia transmitida por la femtocelda interferente (círculo rojo), es decir, los 23 dBm.

Considerando que el factor Q tendrá un valor de 1 en nuestro caso debido a que la señal interferente es mucho más débil que la recibida dentro de la propia femtocelda, el valor esperado de la potencia de interferencia intercelular viene dado por:

$$E[P_{inter}] = \sum_{i=1}^N P_{rxid} e^{(\beta\sigma)^2/2} \quad (4.32)$$

Donde

- N es el número de femtoceldas interferentes
- $P_{rxid} = \frac{P_{tx_{femto_total}}}{l_{pid}}$, l_{pid} son las pérdidas que sufre el usuario i hasta la femtocelda interferente d.

4.5.2.2 Varianza de la potencia de interferencia para los servicios de voz y datos

El cálculo para la varianza de interferencia como en el caso de la esperanza se hará también respecto al usuario con las pérdidas mayores dentro de la cobertura femtocelda.

En el enlace downlink no hay varianza intracelular ya que el usuario recibe su señal y la señal interferente por el mismo camino. Sin embargo, si estudiamos la interferencia provocada

por femtoceldas dentro del propio edificio o de otros edificios, entonces sí habrá varianza de interferencia intercelular porque el usuario recibirá la señal de las otras femtoceldas.

La varianza de la potencia de interferencia intercelular viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{var}[P_{inter}] = \sum_{i=1}^N (P_{rxid})^2 \left\{ e^{2(\beta\sigma)^2} - (e^{(\beta\sigma)^2/2})^2 \right\} \quad (4.33)$$

4.5.2.3 Capacidad de la femtocelda para los servicios de voz y datos

Con las expresiones anteriores que nos permiten calcular los estadísticos de la potencia de interferencia podemos calcular la relación señal a interferencia más ruido del servicio s como en el caso del enlace ascendente pero con una pequeña variación ya que al utilizarse códigos ortogonales (OSVF) éstos permiten mantener la ortogonalidad entre canales de distintos usuarios y así reducir la interferencia intracelular. De ese modo la ecuación para la SNR queda de la siguiente manera:

$$\frac{C}{I} = \frac{\frac{P_{tx_femto}}{A \cdot l_{p_max} \cdot \alpha_s}}{E[P_{intra}] + E[P_{inter}] + Q^{-1}(\alpha) \sqrt{\text{var}[P_{inter}] + P_n}} \quad (4.34)$$

Donde:

- $\frac{P_{tx_femto}}{A \cdot l_{p_max} \cdot \alpha_s}$ es la potencia recibida por el usuario más alejado de la femtocelda.
- α_s es el factor de actividad del usuario que depende del servicio prestado.

4.6 Cálculo de la capacidad de femtoceldas con canal compartido.

En este apartado se estudia el caso de femtoceldas que comparten la banda de frecuencias con el resto de la red móvil cercana. Por tanto, se tendrá que tener en cuenta la interferencia provocada por las estaciones base y los equipos usuarios de la red macrocelda que tendrán un efecto negativo en la capacidad de nuestra femtocelda.

4.6.1 Análisis para el enlace ascendente

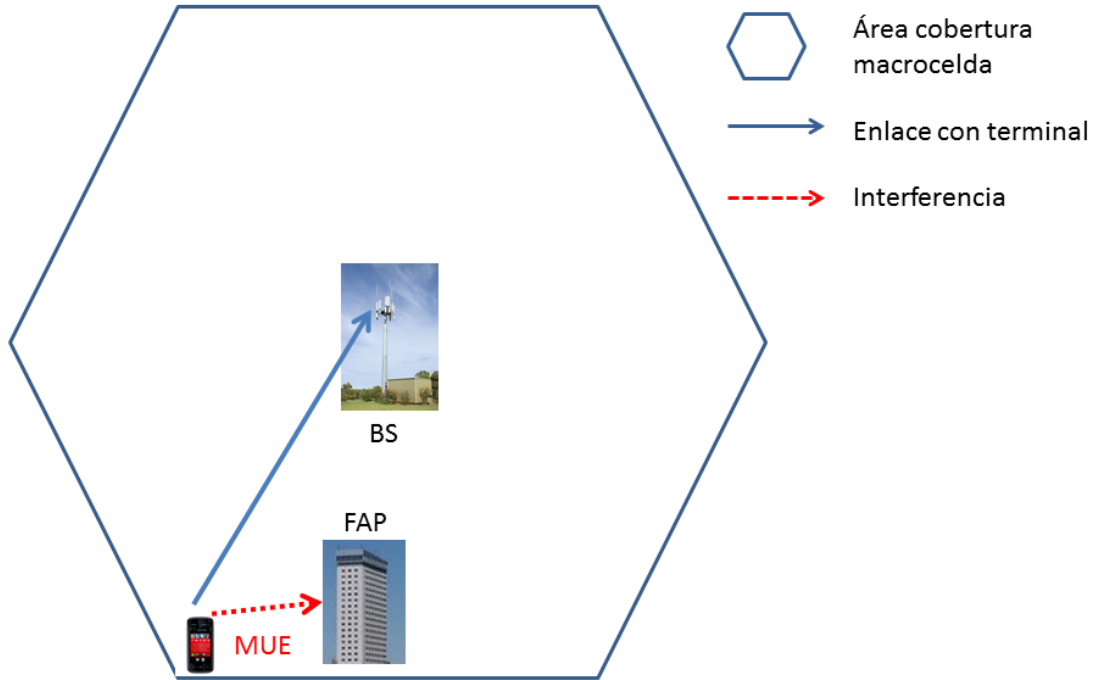


Figura 4.3 – Análisis de la interferencia macrocelda en enlace ascendente

Si consideramos que el peor usuario dentro de la femtocelda bajo estudio sufre unas pérdidas por propagación en interiores igual a L_{im} y el usuario MUE interferente sufre unas pérdidas hacia la femtocelda bajo estudio igual a L_{id} el factor de relación de interferencia intercelular respecto del usuario con peor cobertura femtocelda vendrá dado por la siguiente expresión:

$$L(r_{id}, r_m) = 10^{(L_{id} - L_{im})/10} \tag{4.35}$$

Las pérdidas que sufre la señal del usuario MUE hasta la femtocelda (L_{id}), dependerá de la distancia a la que se encuentre y la posición respecto al edificio (Norte, sur, este u oeste)

4.6.1.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Assumiendo que los usuarios macrocelda no tienen permiso para conectarse con la femtocelda, ahora no se tiene en cuenta el efecto del factor Q ya que todo se considera interferencia. De esta manera la expresión para la esperanza de potencia de interferencia debida a los usuarios macrocelda se calcula según:

$$E[P_{intermacro}]_s = P_{r,s} \alpha_s e^{(\beta\sigma)^2/2} \sum_{i=1}^{N_{u,s}} L(r_{id}, r_{im}) \tag{4.36}$$

Donde:

- $N_{u,s}$ se refiere al número de usuarios macrocelda interferentes.

4.6.1.2 Varianza de la potencia de interferencia para los servicios de voz y datos

Al igual que ocurría con la expresión para la esperanza, en el caso de la varianza tampoco se tendrá en cuenta los factores que dependen de Q. Así, la ecuación para el cálculo de la varianza queda de la siguiente manera:

$$Var[P_{intermacro}]_s = P_{r,s}^2 \sum_{i=1}^{N_{u,s}} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ e^{2(\beta\sigma)^2} p\alpha_s - \left(e^{(\beta\sigma)^2/2} \right)^2 q\alpha_s^2 \right\} \quad (4.37)$$

4.6.1.3 Capacidad de la femtocelda para los servicios de voz y datos

Añadiendo a la esperanza y varianza total el término debido a la interferencia macrocelda podemos calcular de nuevo la capacidad con la ecuación (4.34) :

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2\sigma_c^2/2} \left(E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s + E[P_{intermacro}]_s \right) \quad (4.38)$$

$$Var[P_{intf}]_s = Var[P_{intra}]_s + Var[P_{inter}]_s + Var[P_{intermacro}]_s \quad (4.39)$$

4.6.2 Análisis para el enlace descendente

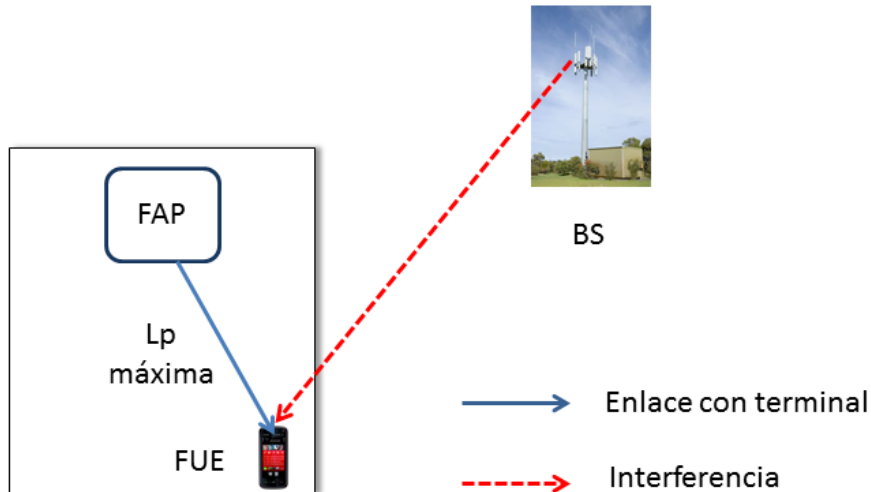


Figura 4.4 – Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace descendente.

En el enlace descendente si consideramos que el usuario FUE (peor usuario dentro de la cobertura femtocelda) recibe una potencia igual a P_m de su femtocelda y una potencia interferente de una macrocelda cercana igual a P_{id} tenemos lo siguiente:

$$P_m = \frac{P_{tx_femto}}{A \cdot l_{p_max} \cdot \alpha_s} \text{ calculada en el apartado 4.5.2}$$

$$P_{id} = \frac{P_{tx_macro} \cdot g_{tx} \cdot g_{rx}}{l_{p_macro}}$$

- P_{tx_macro} es la potencia que transmite la estación base i macrocelda en un sector.
- L_{p_macro} son las pérdidas que sufre la señal desde la estación base macrocelda hasta el usuario i.
- g_{tx} es la ganancia del transmisor (BS)
- g_{rx} es la ganancia del receptor (FUE)
- N son los usuarios servidos por la macrocelda.

4.6.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

En este caso vamos a considerar que toda la señal recibida por la macrocelda va a ser interferencia, es decir, no se considera el efecto del factor Q. Así, la expresión para el cálculo del valor esperado de potencia de interferencia debida a la macrocelda es la siguiente:

$$E[P_{intermacro}]_s = P_{i,d} \sum_{n=1}^{N_{u,d}} e^{(\beta\sigma)^2/2} \quad (4.40)$$

Donde $U_{n,d}$ es el número de estaciones base macrocelda interferentes.

4.6.2.2 Varianza de la potencia de interferencia para los servicios de voz y datos

Para la varianza al igual que ocurría con la esperanza tampoco se tendrá en cuenta los factores que dependen de Q. Así la ecuación para el cálculo de la varianza queda de la siguiente manera:

$$Var[P_{intermacro}]_s = P_{i,d}^2 \sum_{n=1}^{N_{u,d}} \{e^{2(\beta\sigma)^2} - (e^{(\beta\sigma)^2/2})^2\} \quad (4.41)$$

4.6.2.3 Capacidad de la femtocelda para los servicios de voz y datos

El cálculo para la capacidad será idéntico al realizado en el apartado 4.5.2.3 pero teniendo en cuenta la interferencia introducida por la macrocelda cercana como se ha hecho en el análisis del enlace ascendente.

4.6.3 Parámetros de simulación.

En la Tabla 4.1 encontramos los principales parámetros de simulación que se han considerado a lo largo del proyecto

Tabla 4.1 – Parámetros de simulación

Parámetro		Valor	Unidades
f	Enlace ascendente	1950	MHz
	Enlace descendente	2100	
P_{tx_FUE}	Voz	A calcular	dBm
	Datos	23	
G_{FUE}		0	dBi
P_{tx_femto}		23	dBm
Piloto		10% P _{tx_femto}	dBm
G_{femto}		0	dBi
W		3480	Hz
R	Voz	12.2	Kbps
	Datos	120	
Ganancia de procesamiento: G_p	Voz	256	
	Datos	32	
Factor de ocupación: α	Voz	0.66	
	Datos	1	
(E_b/N₀)_{target}	Voz	7	dB
	Datos	3	
P_n		-100	dBm
Desviación típica por shadowing: σ_{sh}	Interiores	3	dB
	Exteriores	4	
Desviación típica control de potencia: σ_c		0.5	dB
		1	
Coficiente de correlación : C_{dm}		0	dB
		0.5	
Modelo Propagación en interiores: Modelo Multi-pared	L _{pared}	6.9	dB
	L _{suelo}	18.3	

CAPÍTULO 5

5 Capacidad del enlace ascendente

5.1 Introducción

Después de analizar los sistemas femtocelda y el estudio para el análisis de los enlaces ascendente y descendente, en este capítulo vamos a estudiar el comportamiento de sistemas en los que coexisten femtoceldas y macroceldas, centrándonos en el cálculo de la capacidad del enlace ascendente para los distintos servicios ofrecidos teniendo en cuenta la esperanza y varianza de la interferencia.

En primer lugar, simularemos escenarios con distintas configuraciones en los que se desplieguen femtoceldas con canal dedicado sin interferencia macrocelda para finalizar con el estudio de sistemas en los que femtoceldas y macroceldas cercanas compartan la misma banda de frecuencias. La Figura 5.1 puede ser una buena representación de lo que sería un escenario real en el que femtoceldas instaladas tanto en viviendas para uso doméstico como en oficinas para uso empresarial conviven con macroceldas cercanas.

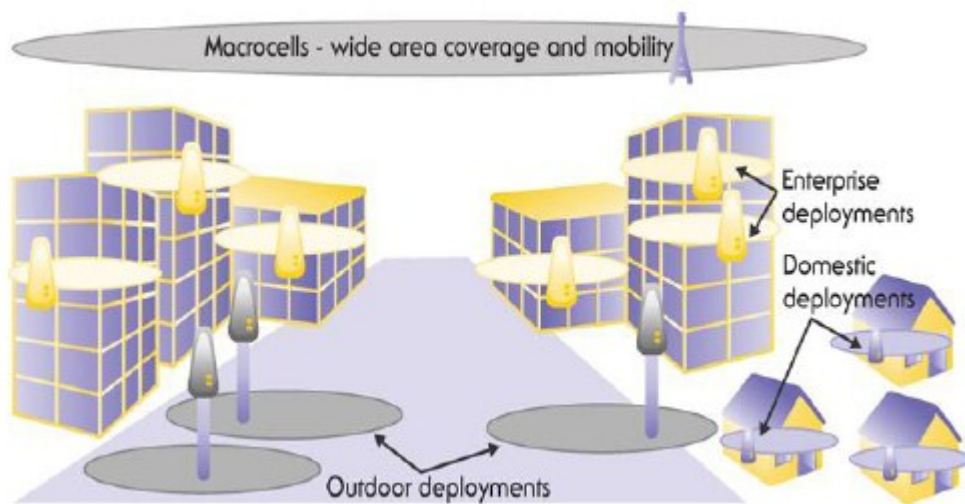


Figura 5.1 – Coexistencia de femtoceldas y macroceldas en un escenario real.

A continuación resumimos la terminología que se va a utilizar a lo largo de todos los escenarios de estudio:

- FAP (Femtocell Access Point) – Punto de acceso femtocelda
- FUE (Femtocell UE) – Equipo usuario femtocelda
- MUE (Macrocell UE) – Equipo usuario macrocelda.
- BS (Base Station) – Estación base macrocelda.

5.2 Escenarios con femtoceldas de canal dedicado

A lo largo de esta apartado se van a analizar una serie de escenarios que van desde el escenario A, con una única femtocelda, hasta el escenario F con varios edificios colindantes. Todos los puntos de acceso femtocelda analizados compartirán la misma banda de frecuencias sin embargo, no la compartirán con la red macrocelda cercana y por tanto, no sufrirán de su interferencia.

Así, el objetivo de este apartado será determinar el efecto de las interferencias generadas entre sistemas femtocelda comparando escenarios con edificios de diferentes características y tipología.

5.2.1 Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario A es el que se muestra en la Figura 5.2 de abajo:

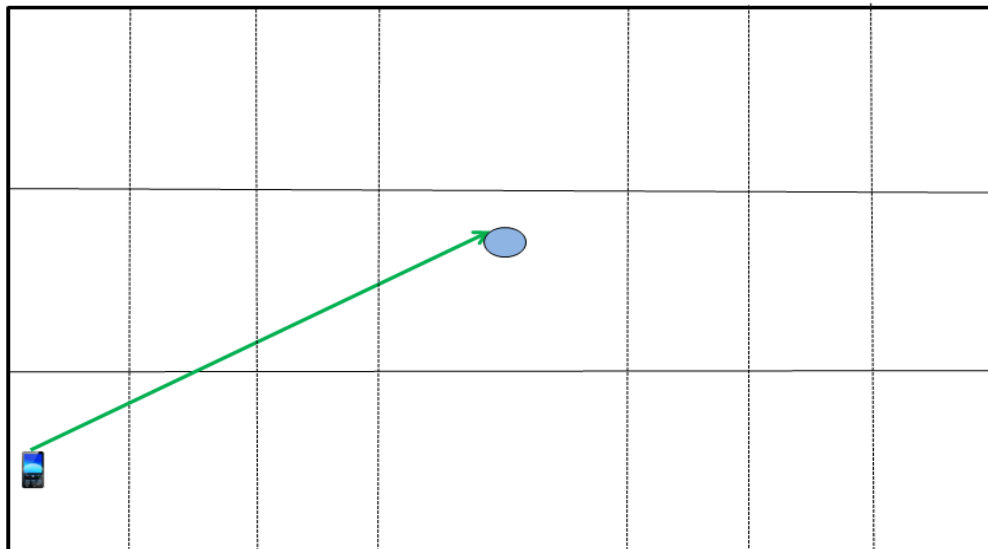


Figura 5.2 – Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.

Características del escenario de partida:

- Una femtocelda (HNB) sirviendo a tres plantas
- Altura de planta: 3m
- 6 paredes por planta
- 1 ubicación de cálculo por habitación

- 21 ubicaciones de cálculo por femtocelda. Por simetría se puede considerar el doble, 42 para tener en cuenta el plano en 3D de cada planta.
- Altura de la antena del usuario: 1.5 m
- Femtocelda situada en el techo a 3m de altura y en el centro de la habitación.
- Edificio de 30 m de anchura, 9m de altura y 10 m de fondo.

En este caso cabe destacar que el usuario bajo estudio sólo sufrirá interferencia intracelular. Por tanto, se ha utilizado la ecuación (4.25) del capítulo 4 para el cálculo de la capacidad considerando sólo los términos que se refieren a la interferencia intracelular, así como el modelo de propagación propuesto en este mismo capítulo para el análisis de enlaces en interiores, el modelo multipared.

Los pasos a realizar no solo en este escenario sino en los siguientes serán:

- Llevar a cabo la simulación analítica para obtener la capacidad del servicio de datos de la femtocelda.
- Una vez obtenidos los resultados para el servicio de datos, se optimiza la potencia de transmisión de voz simulando el sistema.
- Con esta potencia calculada, se obtienen los resultados para la capacidad de voz.
- Por último, se realiza el cálculo conjunto de capacidad para los dos servicios, es decir, para un número dado de usuarios de datos, se obtiene el número de usuarios de voz a los que podría dar servicio la femtocelda.

Resultados y conclusiones

Los resultados para la capacidad se han obtenido para dos valores distintos de la desviación típica de control de potencia ($\sigma_c = 0.5/1.0$ dB), lo que nos permitirá estudiar cómo afecta a la capacidad el uso de un control de potencia más o menos fino.

En primer lugar analizamos los resultados obtenidos para el servicio de datos en función de la probabilidad de desbordamiento que aparecen en la Figura 5.3.

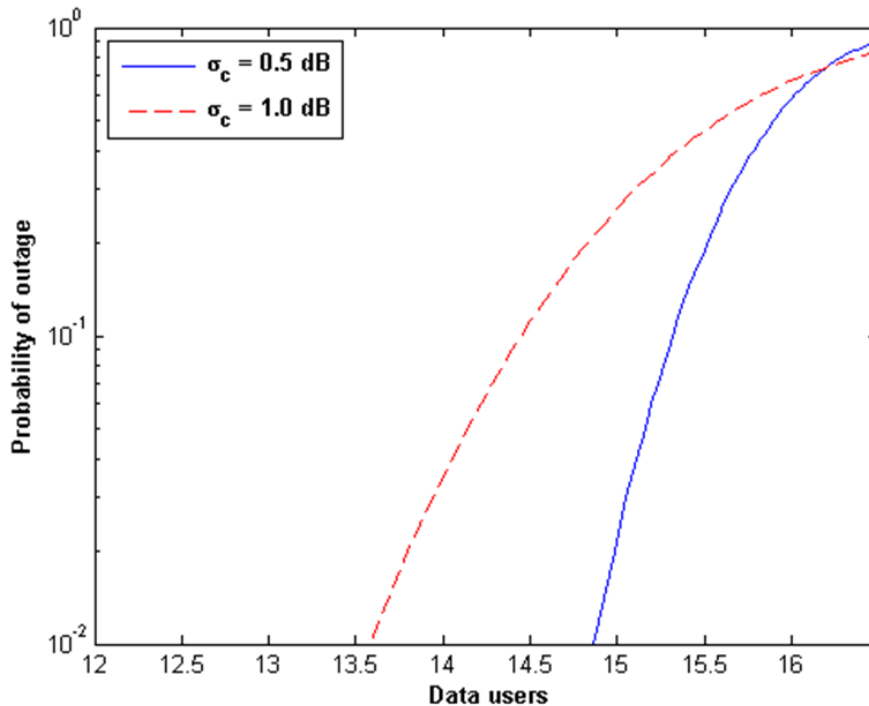


Figura 5.3 – Escenario A: Capacidad del servicio de datos.

Se puede ver como para un control de potencia más fino, es decir, para un valor de σ_c igual a 0.5 dB, la capacidad es mayor. Esto se debe a que en escenarios con pocas variaciones en su entorno como en el que nos encontramos, un ajuste más fino en el control de potencia de transmisión de los usuarios favorecerá a que el sistema tenga un comportamiento mejor en estas circunstancias.

Ahora nos centramos en el servicio de voz. Como vimos en el capítulo 4, la relación entre la potencia máxima de transmisión de datos y la potencia máxima de transmisión para usuarios de voz viene dada por la ecuación (4.27), por tanto aplicando la fórmula con los datos correspondientes, la relación que obtenemos es: $\left(\frac{P_{td}}{P_{tv}}\right)_{dB} = 5$ dB

Por lo tanto, si no tenemos en cuenta la varianza de la interferencia y la potencia de transmisión máxima para el servicio de datos es de 23 dBm, la potencia de transmisión máxima para el servicio de voz será 5 dB menor, es decir, 18 dBm.

Partiendo de este dato y teniendo en cuenta la varianza de interferencia en la simulación, el valor para la potencia de voz obtenido es de 17.85 dBm.

La Figura 5.4 muestra la capacidad para el servicio de voz en función de la probabilidad de bloqueo, utilizando el valor de potencia de transmisión calculado anteriormente.

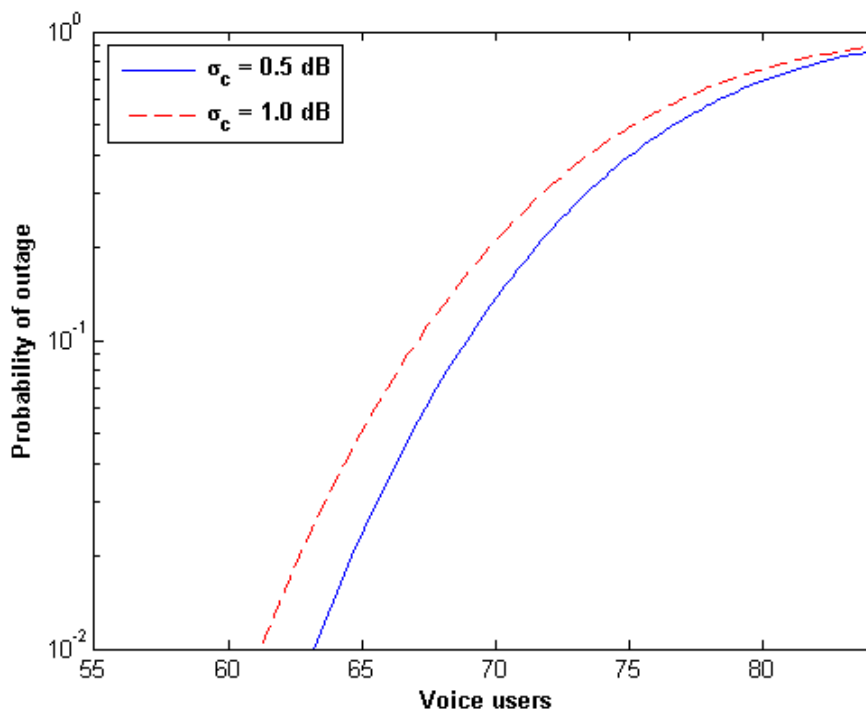


Figura 5.4 - Escenario A: Capacidad del servicio de voz

Veamos ahora el comportamiento de la femtocelda sirviendo a usuarios tanto de voz como de datos simultáneamente. Para ello se ha tomado un número fijo de usuarios de datos aproximadamente igual a la mitad de los usuarios de datos obtenidos para una probabilidad de bloqueo del 1%. Por tanto, si teníamos 14 usuarios para dicha probabilidad tomaremos 7 usuarios de datos. Con estas consideraciones previas, los resultados obtenidos aparecen reflejados en la Figura 5.5.

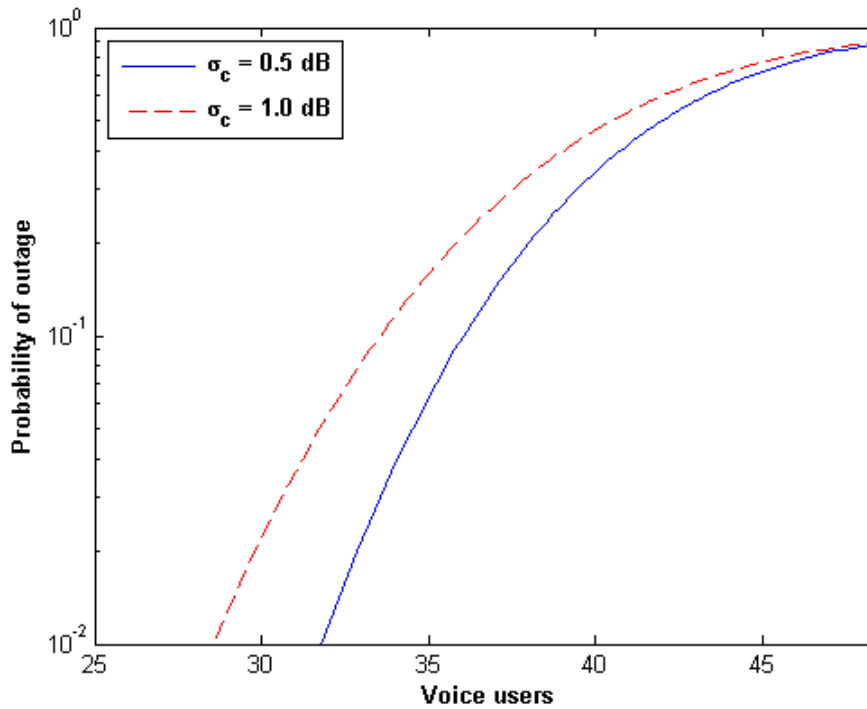


Figura 5.5 – Escenario A: Capacidad del servicio de voz– $N_{\text{datos}} = 7$.

La Tabla 5.1 recoge los resultados obtenidos para los distintos servicios analizados para una probabilidad del 1%.

Tabla 5.1- Escenario A: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ usuarios datos
0.5	14.86	63.20	31.83
1	13.58	61.10	28.50

El número de usuarios de datos es de 14.86 y 13.58 para σ_c de 0.5 y 1.0 dB respectivamente. Para el servicio de voz tenemos 63.20 y 61.10 usuarios. Se observa que para un servicio conjunto de voz y datos, con 7 usuarios de datos, la capacidad de voz se reduce aproximadamente a la mitad de la que obteníamos con un servicio de voz único. Los resultados obtenidos son bastante factibles dentro del escenario real que se ha propuesto. Si consideramos que 7 usuarios de media están haciendo uso del servicio de datos simultáneamente, nuestra femtocelda sería capaz de servir además a unos 30 usuarios de voz.

5.2.2 Escenario B: Femtocelda sirviendo a 5 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario B es el que se muestra en la Figura 5.6:

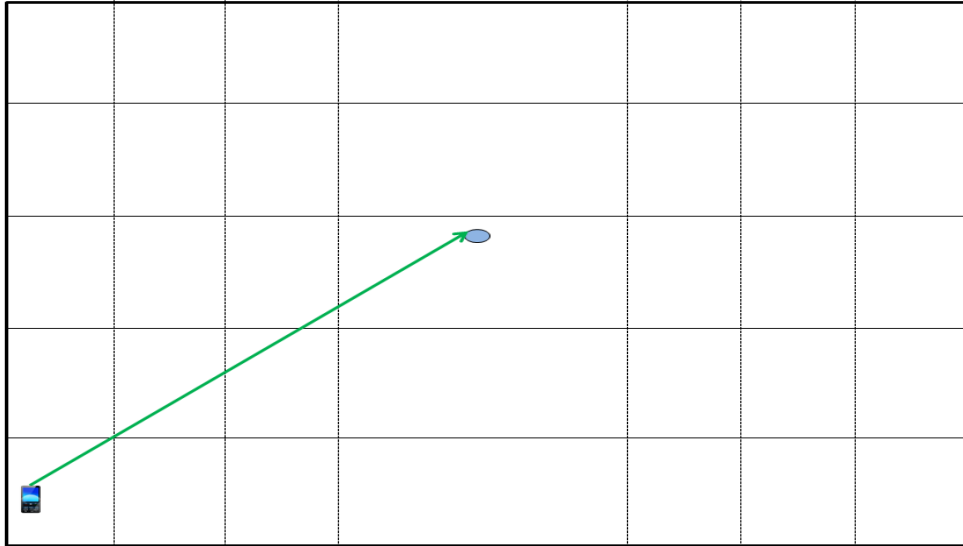


Figura 5.6 – Escenario B: Femtocelda sirviendo a 5 plantas.

Con la simulación de este escenario se busca determinar cuál será la configuración más adecuada para una única femtocelda comparando los resultados de los escenarios A y B.

De la misma manera que ocurría en el escenario A, en este caso sólo se tiene en cuenta el efecto de la interferencia intra. El procedimiento para calcular la capacidad será el mismo que en el caso anterior considerando ahora que el número de ubicaciones de cálculo será 35 y no 21 al tener dos plantas más.

Resultados y conclusiones

La Figura 5.7 y la Figura 5.8 nos muestran la capacidad de datos y voz respectivamente en función de la probabilidad de desbordamiento y la Figura 5.9 la capacidad conjunta de voz más datos.

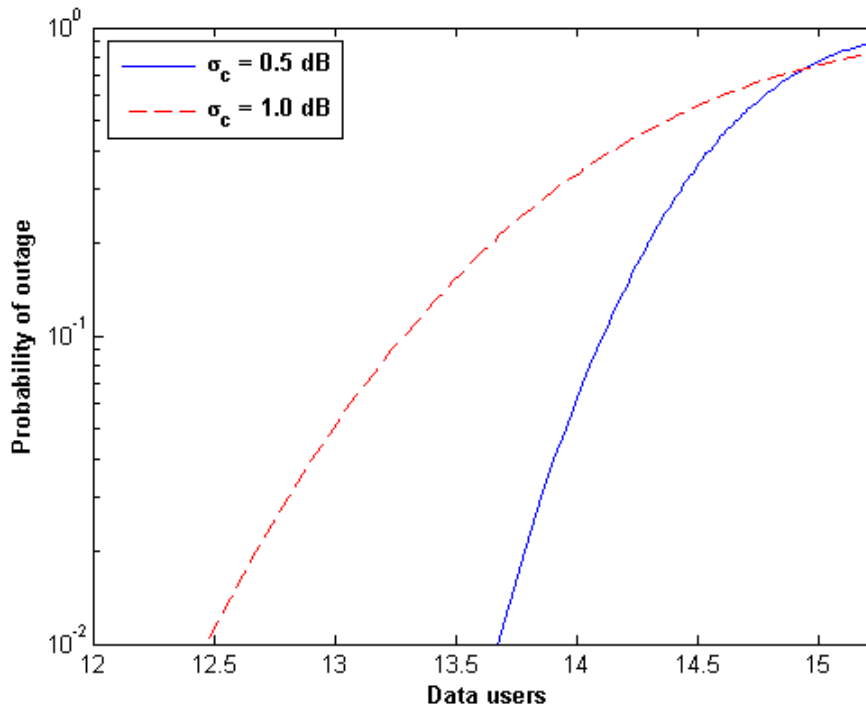


Figura 5.7 – Escenario B: Capacidad del servicio de datos.

El valor obtenido en la simulación para la potencia de transmisión de voz es en este caso es de 17.75 dBm

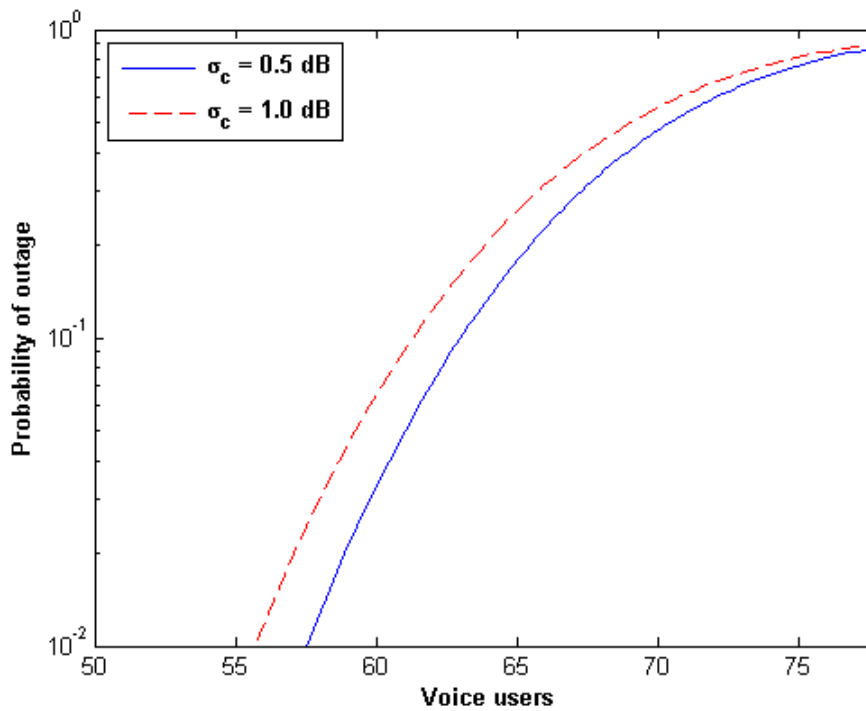


Figura 5.8 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz.

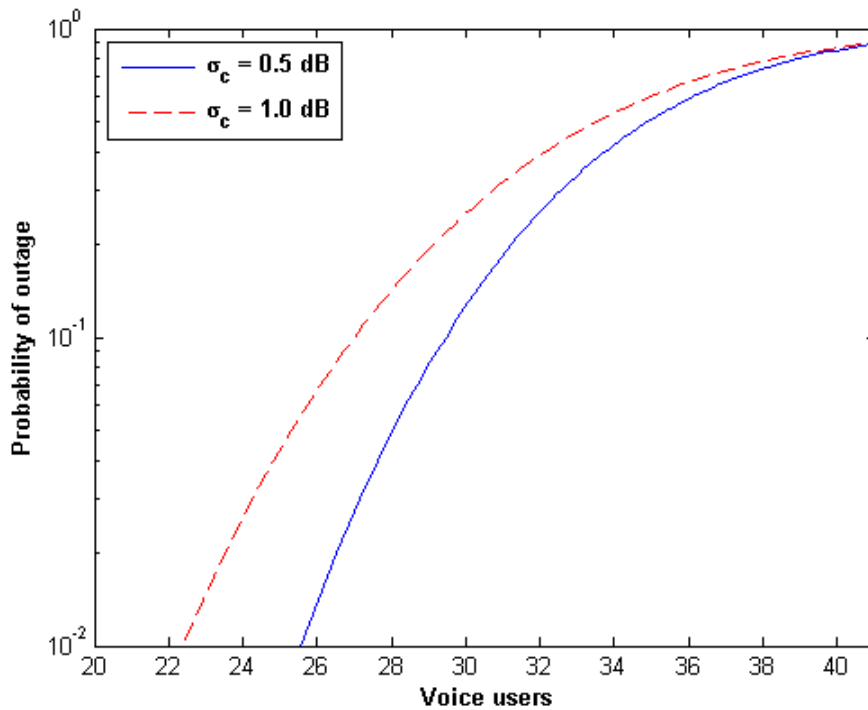


Figura 5.9 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$.

Por último en la Tabla 5.2 se resumen los resultados obtenidos para la capacidad uplink ofrecida por la femtocelda en este escenario pero ahora sólo para una probabilidad de desbordamiento del 1%.

Tabla 5.2 – Escenario B: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ usuarios datos
0.5	13.67	57.5	25.6
1	12.46	55.6	22.3

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el escenario A, la capacidad de ambos servicios disminuye. Para datos, la bajada está en torno al 8% y en el caso de voz es del 9% (Consultar Tabla 5.1).

Si observamos ahora los resultados obtenidos para la capacidad conjunta de voz y datos, el comportamiento del sistema empeora también ya que si tenemos 7 usuarios de datos, la femtocelda ahora sólo podrá servir a 25.6 usuarios con una desviación típica de potencia de 0.5 dB y a 22.3 si es de 1.0 dB lo que se traduce en una bajada del 19.6%. Esto puede ser crítico en este nuevo escenario en el que tenemos 35 despachos/habitaciones en vez de 21.

Por tanto, se puede concluir que ahora con esta configuración, la capacidad está limitada por interferencia y ruido lo que hace que el servicio que pueda prestar nuestra femtocelda en este escenario sea peor que el que preste en el escenario A.

De la conclusión anterior se deriva que para el resto de simulaciones se haya utilizado la configuración del escenario A ya que aunque en algunos casos suponga el despliegue de un mayor número de femtoceldas, el comportamiento global del sistema será mejor que si tuviéramos la configuración del escenario B.

5.2.3 Escenario C: Dos femtoceldas en un edificio de 6 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario C es el que se muestra en la Figura 5.10:

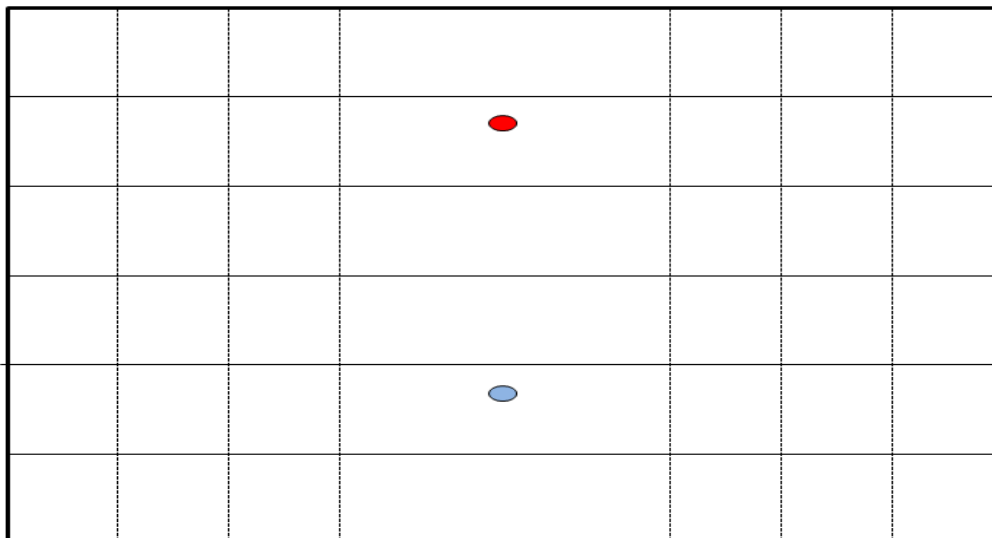


Figura 5.10 – Escenario C: Despliegue de dos femtoceldas sirviendo a 6 plantas.

El objetivo de este escenario es estudiar qué efecto tendrá sobre la capacidad de nuestra femtocelda original del escenario A, el despliegue de un nuevo punto de acceso en el mismo edificio. Se estudiará el caso en el que la nueva femtocelda se instale por encima de la de estudio y se comparará con el despliegue de una inferior.

Al introducir un nuevo FAP dentro del edificio, ahora existirá interferencia intercelular debido a los enlaces ascendentes de los usuarios de la femtocelda superior. Por tanto, para el cálculo de la capacidad se tendrá que tener en cuenta el factor de relación de interferencia intercelular $L(r_{id}, r_{im})$, [ecuación (4.11)] y por tanto, tendremos que aplicar la fórmula para el cálculo de la capacidad considerando los términos que se refieren a la esperanza y varianza de interferencia intercelular. Además los cálculos se han realizado para dos valores de

coeficientes de correlación inter-femtocelda: 0 y 0.5 para así poder estudiar cómo afecta este parámetro al desvanecimiento por sombra que sufre la señal.

Resultados y conclusiones

La Figura 5.11, la Figura 5.12 y la Figura 5.13 muestran la capacidad de la femtocelda bajo estudio para el servicio de datos, voz y conjunto voz + datos respectivamente para el caso en el que tengamos dos femtoceldas con un coeficiente de correlación igual a 0.5.

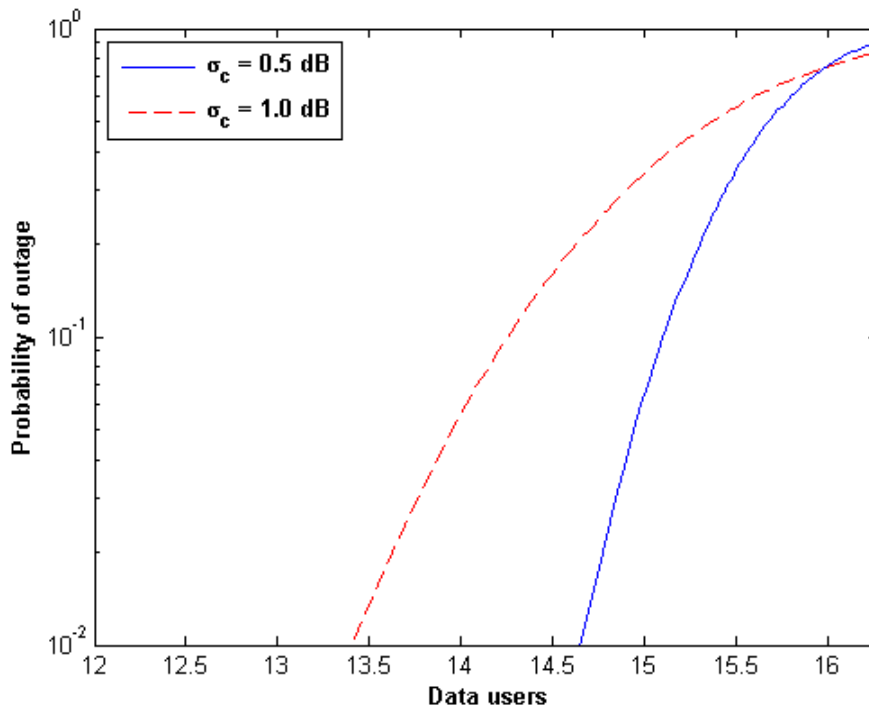


Figura 5.11 – Escenario C: Capacidad del servicio de datos - Femtocelda interferente superior - $C_{dm} = 0.5$

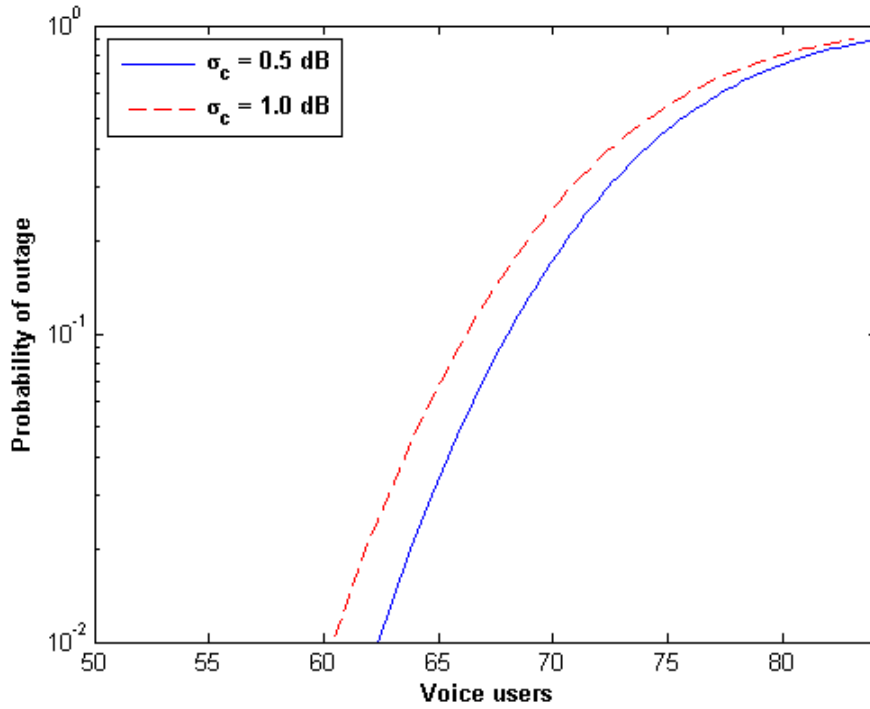


Figura 5.12 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz - Femtocelda interferente superior - $C_{dm} = 0.5$

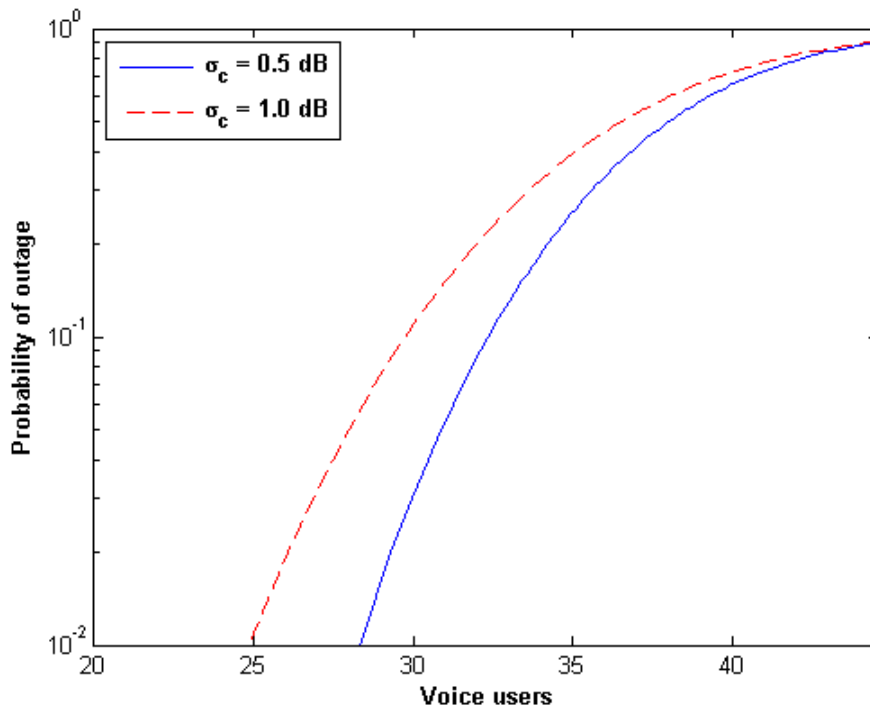


Figura 5.13 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz - $N_{datos} = 7$ - Femtocelda interferente superior
 $C_{dm} = 0.5$

En la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4 se recogen los resultados obtenidos para la capacidad de los distintos servicios para los dos valores de coeficiente de correlación estudiados.

Tabla 5.3 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - $C_{dm} = 0.5$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.65	62.38	28.3
1	13.40	60.38	24.85

Tabla 5.4 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - $C_{dm} = 0$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.57	62.16	28.04
1	13.34	60.16	24.60

Se observa, comparando las dos tablas superiores que los resultados para un coeficiente de correlación igual a 0 son un poco peores que en el caso de 0.5, esto se debe a que la desviación típica efectiva del sistema por shadowing será mayor, lo que se traduce en una interferencia mayor entre las señales de los usuarios de las dos femtoceldas al no tener ninguna correlación entre ellas.

Por otro lado, la bajada que se produce al introducir una femtocelda más en el edificio y coeficiente de correlación igual a 0.5 y control de potencia de 0.5 dB es del 1.41% aproximadamente para datos y del 1.3 % para el servicio de voz.

Los resultados que se muestran ahora en la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6 se corresponden con los valores obtenidos para el sistema en el que el nuevo punto de acceso se instala por debajo del de estudio.

Tabla 5.5 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Femtocelda interferente inferior - $C_{dm} = 0.5$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.74	62.70	28.64
1	13.48	60.68	25.17

Tabla 5.6 – Escenario C: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Femtocelda interferente inferior - $C_{dm} = 0$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.69	62.57	28.49
1	13.44	60.56	25.03

Los resultados muestran que la interferencia de la femtocelda inferior es algo menor que en el caso de la superior. Esto se debe únicamente a la suposición que se ha hecho de la posición de las ubicaciones de cálculo para realizar los cálculos. Las señales de los usuarios de la femtocelda inferior sufrirán unas pérdidas mayores no porque atraviesen más obstáculos

sino porque la distancia que deben recorrer es algo mayor, por eso existe esa ligera diferencia en cuanto a la capacidad.

5.2.4 Escenario D: Tres femtoceldas en un edificio de 9 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario D aparece representado en la Figura 5.14 de abajo:

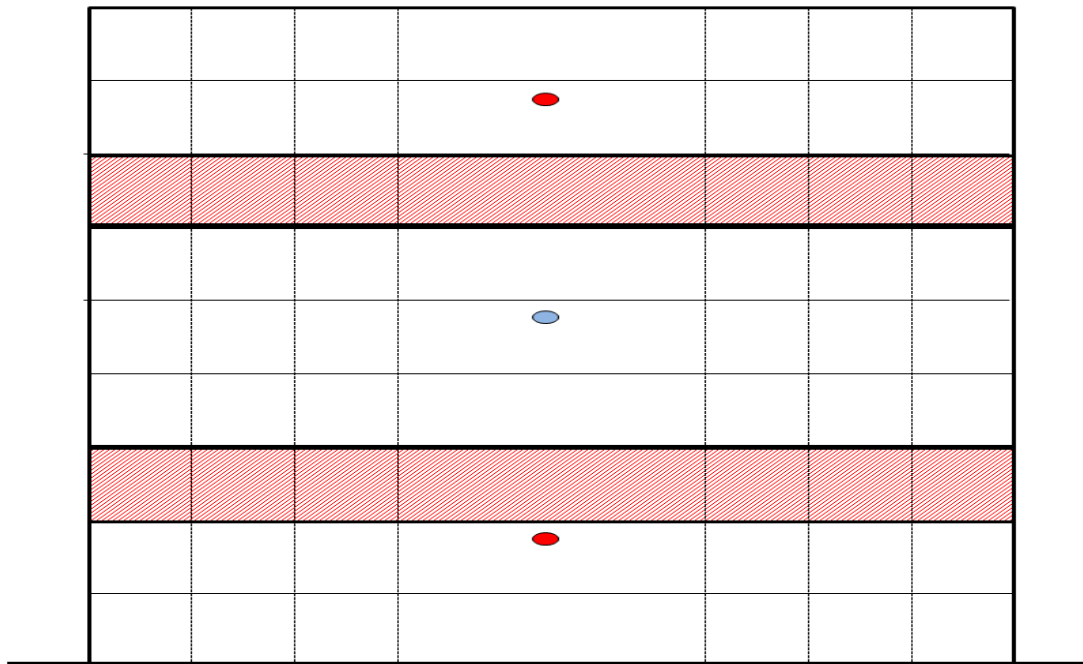


Figura 5.14 – Escenario D: Despliegue de 3 femtoceldas en un edificio de 9 plantas.

La Figura 5.14 muestra un edificio de 30 m de anchura y 27 m de altura con 9 plantas. Partiendo de la configuración del escenario A, se necesitan desplegar 3 femtoceldas para cubrir las 9 plantas del edificio. De las 3 femtoceldas, la central será la femtocelda bajo estudio ya que será de todas la que tenga la capacidad más baja. Para el cálculo de la capacidad, ahora hay que considerar además de la interferencia intracelular, la interferencia provocada por los usuarios uplink de las femtoceldas superior e inferior, que será interferencia inter femtocelda y que ya se ha estudiado en el apartado anterior. Cabe destacar que la mayor parte de la interferencia intercelular viene de los usuarios de las plantas más cercanas a la femtocelda bajo estudio (zona sombreada de la Figura 5.14). Esta afirmación se puede ver mejor con la siguiente representación en la que se muestra el factor de interferencia intercelular debido a la distancia y las pérdidas de propagación que se vio en el capítulo 4 [Ecuación (4.10)] y en el que no se tiene en cuenta ni el efecto por shadowing ni el uso de control de potencia.

Tabla 5.7 – Escenario D: Factor de interferencia intercelular en cada punto de cálculo para cada planta.

0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0312	0.0317	0.0328	0.0352	0.0328	0.0317	0.0312
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	●	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0235	0.0209	0.0170	0.0111	0.0170	0.0209	0.0235
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0003	0.0003	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0003

Así, se puede ver como los usuarios de las plantas centrales de las femtoceldas superior e inferior no producen interferencia sobre la femtocelda bajo estudio debido a que la diferencia entre las pérdidas que sufren hacia su femtocelda y las pérdidas hacia la femtocelda bajo estudio es muy elevada. Algo similar ocurre con las plantas más alejadas de la femtocelda bajo estudio (1ª y 9ª planta) aunque estas sí tendrán una pequeña aportación a la interferencia debido a que la diferencia entre pérdidas no será tan grande.

Por último, decir que el método a seguir para el cálculo de la interferencia y la capacidad es idéntico al del apartado anterior.

Resultados y conclusiones

Al igual que en los escenarios anteriores, se ha realizado primero el cálculo para el servicio de datos y voz por separado (Figura 5.15 y Figura 5.16) y a continuación se ha estudiado la capacidad conjunta voz más datos (Figura 5.17). Los resultados que aparecen en estas figuras son para un valor de coeficiente de correlación igual a 0.5. En la Tabla 5.9 se presenta la capacidad de la femtocelda para un coeficiente de correlación inter-femtocelda igual a 0.

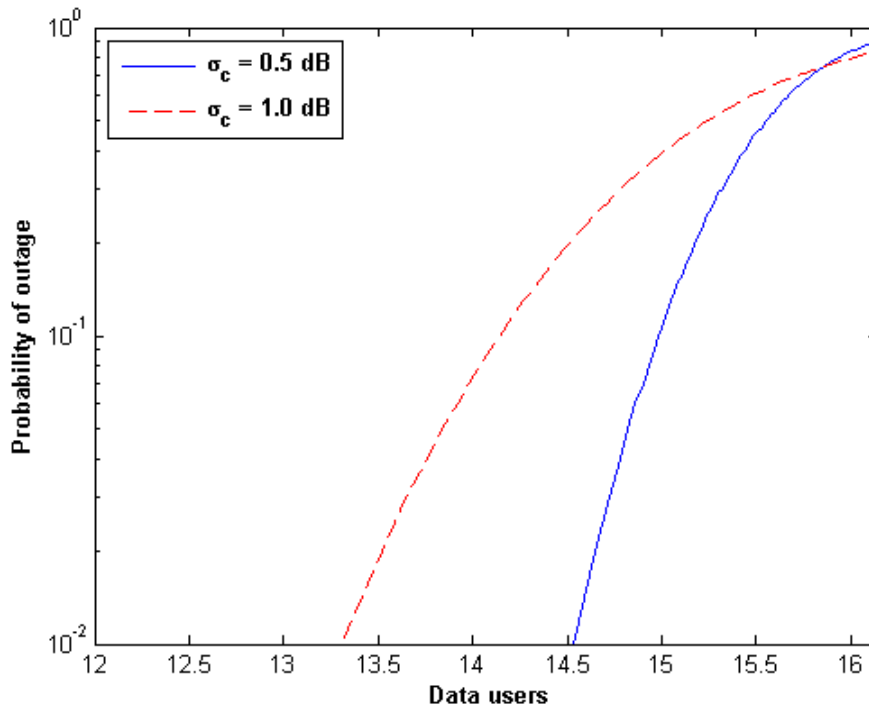


Figura 5.15 – Escenario D: Capacidad del servicio de datos – $C_{dm} = 0.5$

El valor obtenido en la simulación para la potencia de transmisión de voz es en este caso de 17.5 dBm.

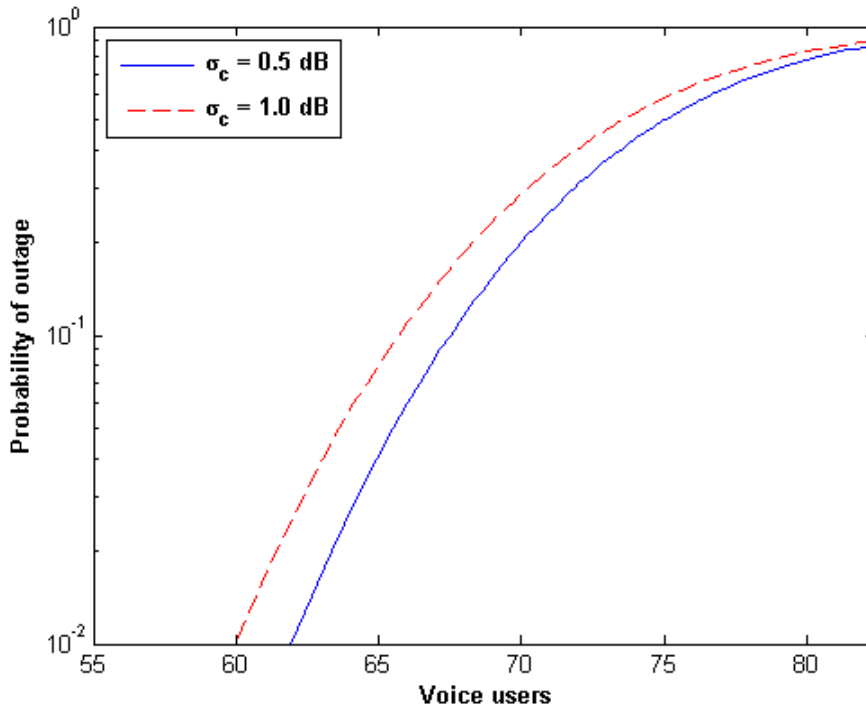


Figura 5.16 – Escenario D: Capacidad del servicio de voz – $C_{dm} = 0.5$

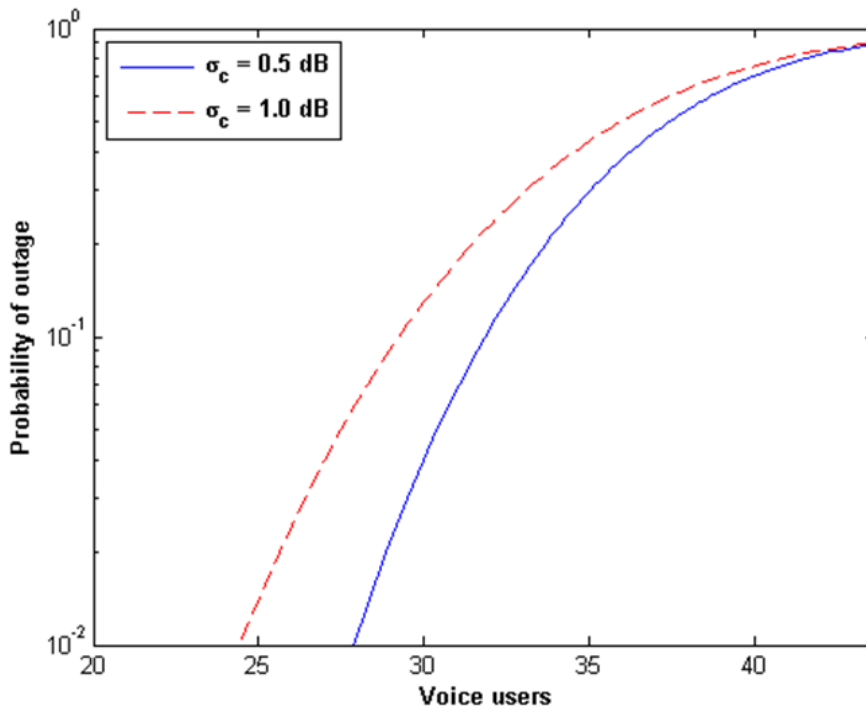


Figura 5.17 – Escenario D: Capacidad del servicio de voz

$$N_{\text{datos}} = 7 - C_{dm} = 0.5.$$

Tabla 5.8 – Escenario D: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% – $C_{dm} = 0.5$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.53	61.90	27.80
1	13.30	59.94	24.40

Tabla 5.9 – Escenario D: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% – $C_{dm} = 0$

σ_c (dB)	N_{datos}	N_{voz}	$N_{voz} + 7$ usuarios datos
0.5	14.41	61.64	27.40
1	13.21	59.65	24.02

Si se observa la Tabla 5.8, la capacidad para datos para σ_c de 0.5 y 1.0 dB es de 14.53 y 13.30 usuarios respectivamente lo que se traduce, si comparamos con los resultados de la Tabla 5.1, en una bajada del 2.1 % debido a la interferencia intercelular de las femtoceldas superior e inferior.

En cuanto a la capacidad para el servicio de voz, los valores obtenidos para una probabilidad de bloqueo del 1% y un coeficiente de correlación de 0.5, son 61.90 y 59.94 usuarios para σ_c de 0.5 y 1.0 dB respectivamente lo que supone una bajada en este caso del 2% respecto al escenario A. Para el servicio conjunto la bajada está en torno al 13%.

En cuanto al estudio del sistema con femtoceldas con un coeficiente de correlación igual a 0 se espera que el comportamiento sea algo peor ya que el coeficiente de correlación refleja la relación entre las señales que llegan de las dos femtoceldas y afecta a la desviación típica conjunta del desvanecimiento por sombra. Explicado de otro modo, si tenemos un coeficiente de correlación igual a 0, las señales no tendrán ninguna correlación, serán independientes y el desvanecimiento eléctrico por sombra será mayor.

Como última conclusión remarcar que si todos los usuarios se encuentran en las plantas más cercanas a la femtocelda bajo estudio, la reducción en la capacidad será casi el triple de la que hemos obtenido anteriormente. Del mismo modo, si los usuarios se concentran en la planta central de su femtocelda, el efecto sobre la femtocelda bajo estudio será casi nulo al transmitir con una potencia menor y sufrir unas pérdidas mayores.

Comparación del Escenario D con otras configuraciones de edificios.

Las dos nuevas configuraciones que se proponen aparecen representadas abajo:

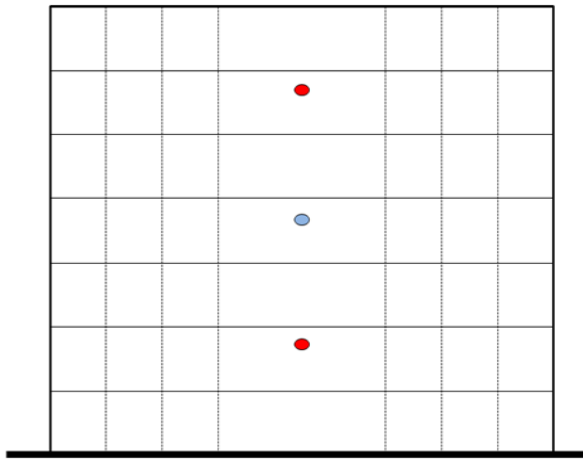


Figura 5.18 – Escenario D: Configuración A

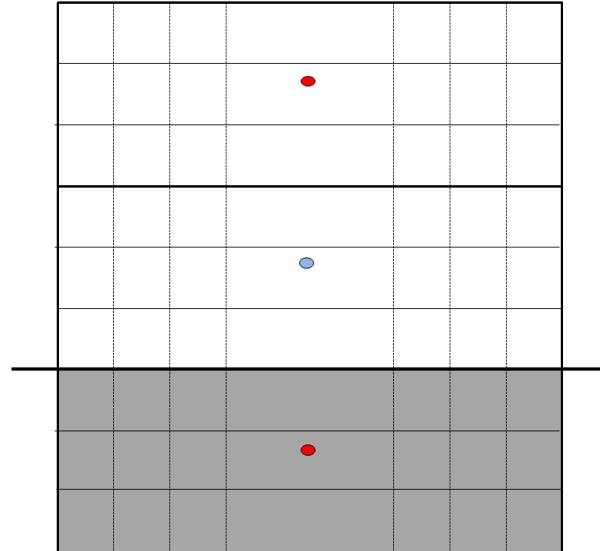


Figura 5.19 – Escenario D: Configuración B

En la configuración A se muestra un edificio de 7 plantas con el mismo número de femtoceldas que en el caso de la configuración con 9 plantas para poder estudiar con esta nueva configuración cuál es el efecto de tener más femtoceldas por planta.

En cuanto a la configuración B, se presenta un edificio de 9 plantas como en el escenario D, sin embargo tres de ellas pertenecen a un garaje que tendrá unas características diferentes que harán que el sistema no se comporte igual. Por un lado, tendremos una densidad de usuarios menor y por otro, los techos del garaje serán más gruesos que el resto lo que supone unas pérdidas mayores. Se considera un valor de 21 dB para las pérdidas por planta del garaje.

Resultados y análisis de las tres configuraciones

En primer lugar vamos a analizar la diferencia entre la configuración B y el escenario D inicial. Se quiere ver cómo afecta el hecho de tener un garaje en nuestro edificio.

En la figura de abajo se muestra como ya se hizo en el escenario D, el factor de interferencia intercelular debido a la distancia y las pérdidas de propagación.

Tabla 5.10 – Factor de interferencia intercelular en cada punto de cálculo para cada planta.

0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0312	0.0317	0.0328	0.0352	0.0328	0.0317	0.0312
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	●	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0209	0.0178	0.0136	0.0082	0.0136	0.0178	0.0209
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Se puede observar que los usuarios que se encuentren en el 2º y 3º sótano del garaje no tendrán efecto en la interferencia ya que al tener que atravesar unas plantas más gruesas sus señales sufrirán unas pérdidas de propagación más elevadas. Por otro lado, la interferencia originada por los usuarios de la femtocelda superior será igual a la que teníamos en el escenario D, ya que las características del edificio son idénticas. Por tanto, se espera que el comportamiento de la femtocelda bajo estudio sea mejor con esta configuración.

Las siguientes tablas recogen los resultados para una probabilidad de bloqueo del 1% obtenidos para la capacidad de los dos casos estudiados. El coeficiente de correlación utilizado es 0.5.

Tabla 5.11 – Capacidad del servicio de datos para las dos configuraciones.

σ_c (dB)	N_{datos}	
	Configuración A (7 PLANTAS)	Configuración B (9 PLANTAS)
0.5	11.22	14.55
1	10.50	13.32

Tabla 5.12 – Capacidad del servicio de voz para las 3 configuraciones.

σ_c (dB)	N_{voz}	
	Configuración A (7 PLANTAS)	Configuración B (9 PLANTAS)
0.5	57.77	62.01
1	55.93	60.01

Tabla 5.13 – Capacidad del servicio de voz para las 3 configuraciones – $N_{datos} = 7$.

σ_c (dB)	$N_{voz} + 7$ usuarios datos	
	Configuración A (7 PLANTAS)	Configuración B (9 PLANTAS)
0.5	17.22	27.91
1	14.25	24.48

Conclusiones

Si empezamos analizando la configuración A se puede decir que la capacidad por femtocelda tanto para voz como para datos disminuye respecto al escenario D debido a que si aumenta el número de femtoceldas por planta la interferencia inter-femtocelda aumenta también. Esto se debe a que los usuarios de las plantas que se encuentran entre dos femtoceldas podrán conectarse, según la condiciones del canal, a su femtocelda superior o inferior indistintamente debido a que las pérdidas que sufren sus señales hacia las dos puntos de acceso son muy similares. Sin embargo, el comportamiento global es mejor por tener una densidad de usuarios por planta mayor.

En cuanto a la configuración B, para todos los casos se obtienen unos valores para la capacidad un poco mayores que en el escenario D. Si teníamos una bajada de un 2.1% para el servicio de datos en este caso baja hasta un 2.08% y para el servicio de voz se pasa de un 2% a un 1.88%. Esto se debe a lo que se comentó anteriormente sobre las características del garaje que hacen que la interferencia de los usuarios situados en los sótanos más bajos sea menor.

5.2.5 Escenario E: Interferencia edificios laterales.

Descripción y objetivos

El esquema del escenario E es el que se muestra en la Figura 5.20:

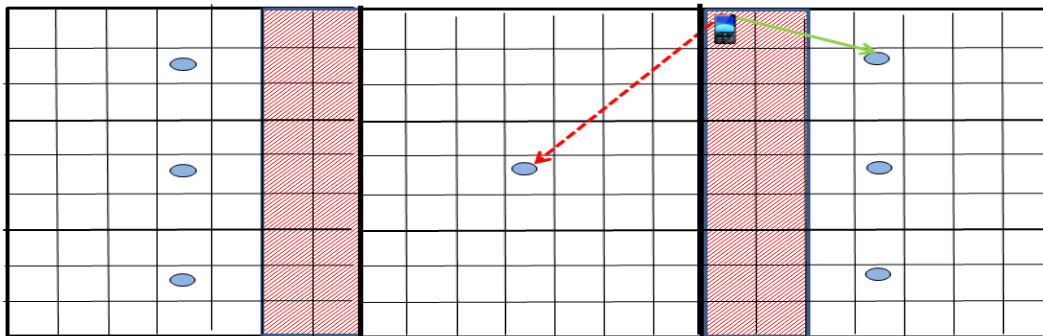


Figura 5.20 – Escenario E: Interferencia edificios laterales.

En este escenario se va a estudiar la interferencia entre sistemas femtocelda de distintos edificios. Para ello se va a considerar que hay dos edificios de ladrillo a ambos lados del edificio donde se encuentra la femtocelda bajo estudio. Las características de dichos edificios son idénticas a las del escenario D (Figura 5.14) con un despliegue de 3 femtoceldas en cada uno de ellos. Por tanto, ahora la interferencia intercelular será mayor debido a los usuarios de las seis femtoceldas de los dos edificios laterales.

Se busca así, ver el efecto de este esquema en la capacidad de la femtocelda central del edificio bajo estudio. En este caso, se seguirá el mismo procedimiento para la simulación del escenario. Sin embargo, habrá que añadir un nuevo término al modelo de pérdidas en interiores que refleje las pérdidas por penetración al atravesar las fachadas de los edificios.

Resultados y conclusiones

Después de realizar los cálculos para la interferencia provocada por los usuarios de los edificios laterales se ha visto que a partir de la 3ª columna de habitaciones la aportación a la interferencia total es despreciable, concentrándose casi el 100% de la interferencia recibida en la 1ª y 2ª columna de habitaciones. La Figura 5.21, Figura 5.22 y Figura 5.23 que aparecen a continuación muestran la capacidad obtenida si tenemos edificios de ladrillo con unas pérdidas por fachada igual a 12 dB y un coeficiente de correlación inter-femtocelda de 0.5.

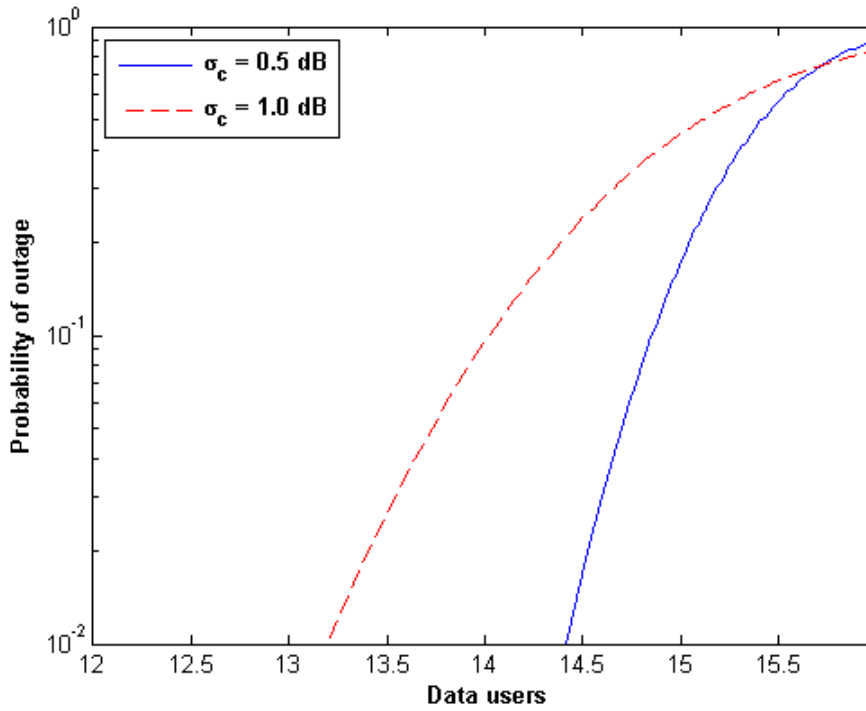


Figura 5.21 – Escenario E: Capacidad del servicio de datos – $L_{fachada} = 12$ dB

El valor obtenido en la simulación para la potencia de transmisión de voz es en este caso de 17.5 dBm

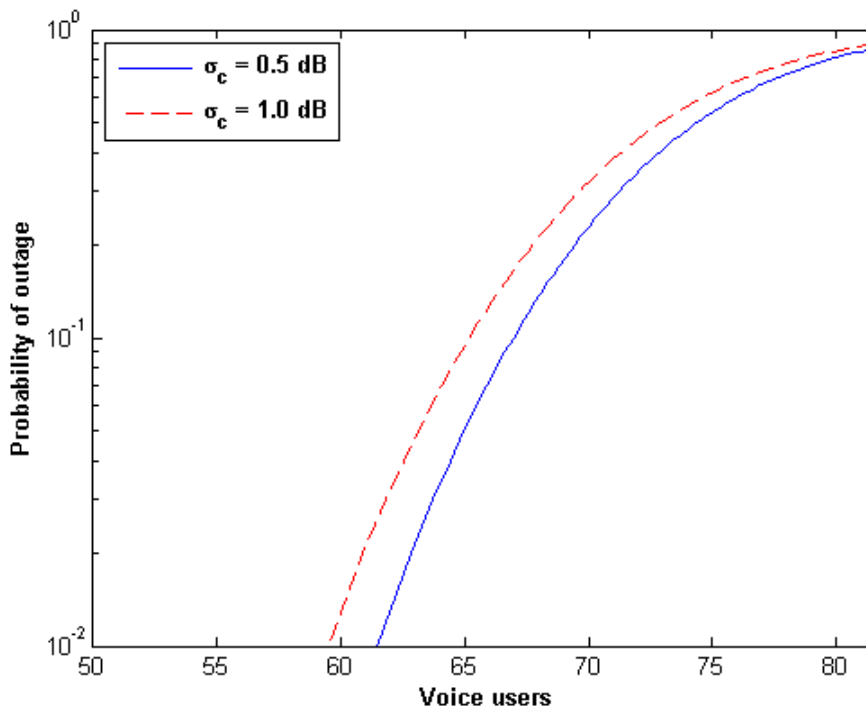


Figura 5.22 – Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $L_{fachada} = 12$ dB

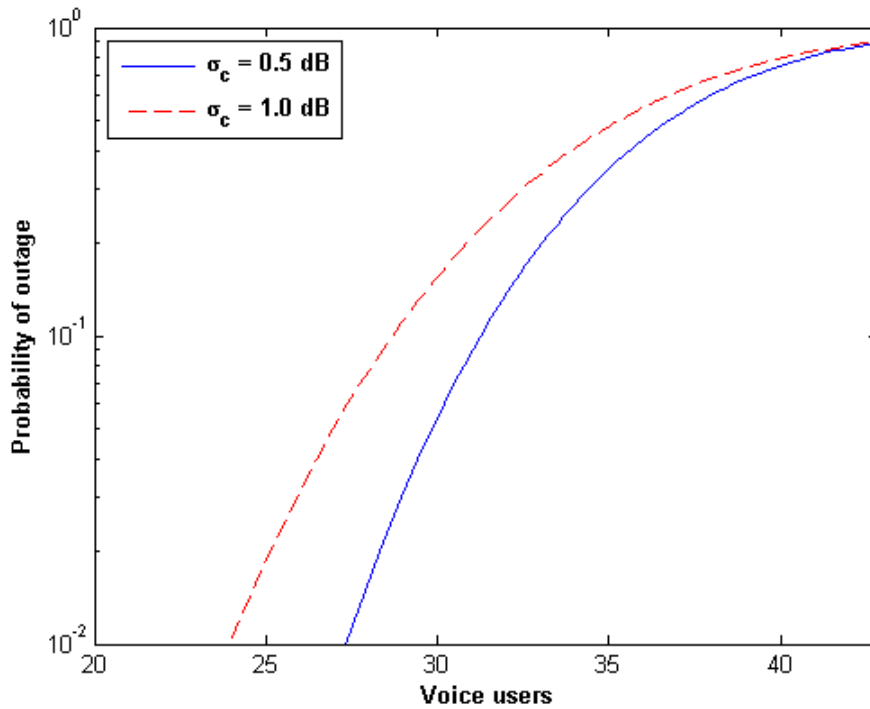


Figura 5.23 – Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB

Si se observan las gráficas que muestran la capacidad obtenida en este caso, se puede ver a simple vista como la bajada no es acusada. Esto se debe a que las señales de los usuarios de los edificios adyacentes llegan bastante mitigadas por las pérdidas por penetración y por el efecto de la distancia.

Tabla 5.14 – Escenario E: Capacidad uplink para una probabilidad de bloqueo del 1%

σ_c (dB)	$L_{\text{fachada}} = 12$ dB			$L_{\text{fachada}} = 10$ dB		
	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}+7\text{datos}}$	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}+7\text{datos}}$
0.5	14.41	61.44	27.33	14.22	60.71	26.58
1	13.19	59.47	24.92	13.03	58.77	23.20

Si comparamos los resultados obtenidos con los del escenario D (Tabla 5.8), se puede decir que la bajada en la capacidad de la femtocelda debida a la interferencia intercelular de los usuarios de los dos edificios laterales es muy pequeña (<1%), sin llegar en ninguno de los casos a una bajada de un usuario. El efecto de edificios contiguos de ladrillo incluso si consideramos unos edificios con unas fachadas con pérdidas un poco menores (10 dB), es casi inapreciable porque la señal se ve mitigada al atravesar las fachadas de los edificios.

5.2.6 Extensión escenario E: Estudio con edificios de cristal.

Descripción y objetivos

El esquema de este nuevo escenario es el que se muestra en la figura de abajo:

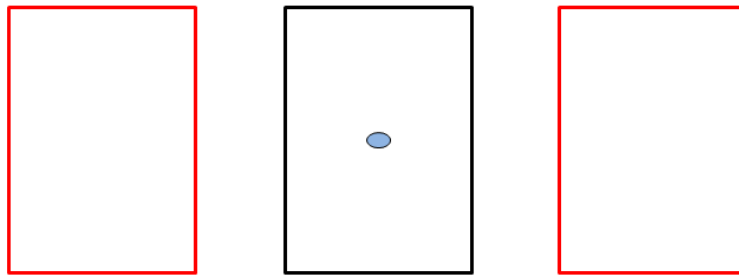


Figura 5.24 – Extensión escenario E: Interferencia edificios laterales de cristal

En este escenario suponemos que existe una separación entre los edificios ya que al tratarse de edificios de oficinas acristalados debe entrar la luz a través de ellos. Se estudiará la capacidad para dos distancias de separación distintas, 15 y 25 m. Por otro lado, se tendrá que tener en cuenta que en este caso las pérdidas por fachadas de cristal son menores que en el caso de fachadas de ladrillo. En este escenario se trabajará con fachadas de cristal con unas pérdidas de 6 dB.

En esta nueva configuración al igual que ocurría en el escenario anterior, casi el total de la interferencia originada en los edificios laterales procederá de los usuarios situados en las dos primeras columnas de habitaciones/despachos.

Resultados y conclusiones

La Figura 5.25, la Figura 5.26 y la Figura 5.27 representan la capacidad para los distintos servicios estudiados para dos distancias de separación entre edificios. El factor de correlación utilizado en este caso es 0.5.

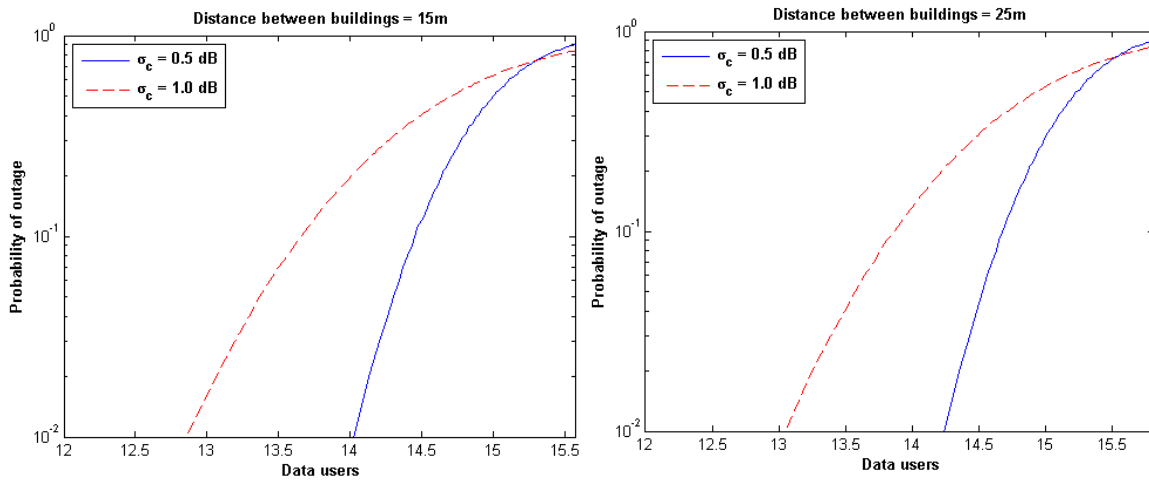


Figura 5.25 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de datos – Distancia entre edificios

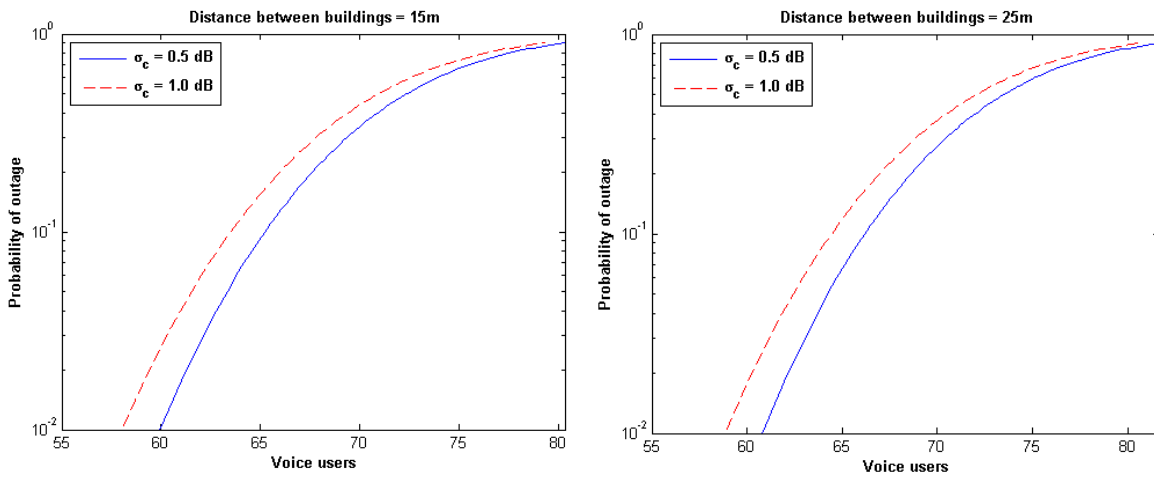


Figura 5.26 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de voz – Distancia entre edificios

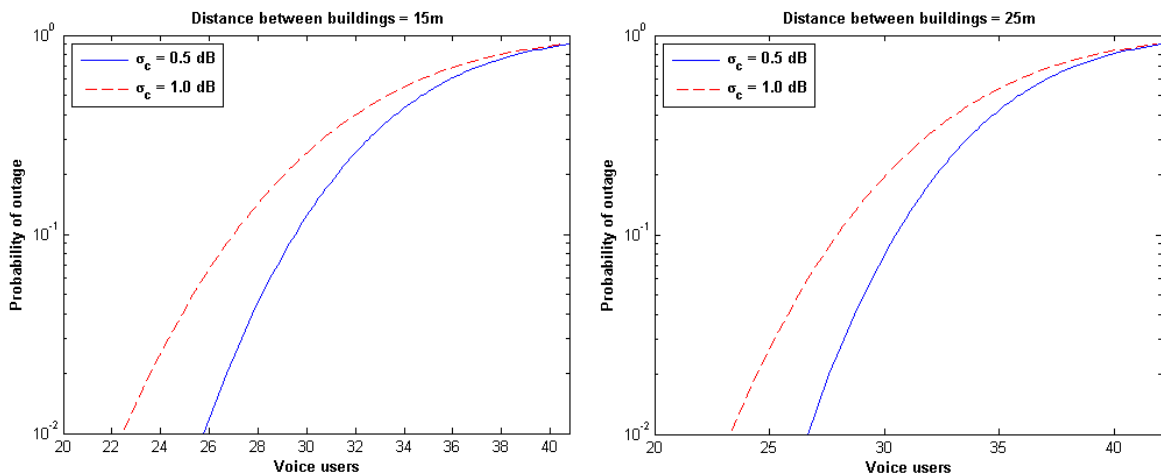


Figura 5.27 – Extensión Escenario E: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – Distancia entre edificios

A simple vista se puede ver como para una distancia mayor entre edificios la capacidad de la femtocelda mejora ligeramente.

Tabla 5.15 – Extensión Escenario E: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Distancia entre edificios

σ_c (dB)	Distancia entre edificios 15m			Distancia entre edificios 25m		
	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7 \text{ datos}$	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7 \text{ datos}$
0.5	14.02	59.92	25.77	14.24	60.78	26.65
1	12.85	58.01	22.43	13.05	58.83	23.27

En este caso, la interferencia con una separación de 15 m provoca una bajada del 3.5% para el servicio de datos y del 3,2% para voz. Por otro lado, si la calle que los separa es más ancha, la interferencia es menor, situándose en una bajada cercana al 2%.

Por tanto, comparando los resultados con los del escenario E con edificios de ladrillo (Tabla 5.14) podemos decir que no existe una gran diferencia entre ambos escenarios. Esto se debe a que a pesar de que se espera una interferencia mayor con edificios acristalados por tener unas pérdidas de penetración más bajas, el efecto de la distancia entre ellos compensa ese efecto haciendo que el comportamiento de ambos sistemas no varíe tanto.

5.2.7 Escenario F: Interferencia edificios posteriores

Descripción y objetivos

El esquema del escenario F es el que se muestra en la Figura 5.28:

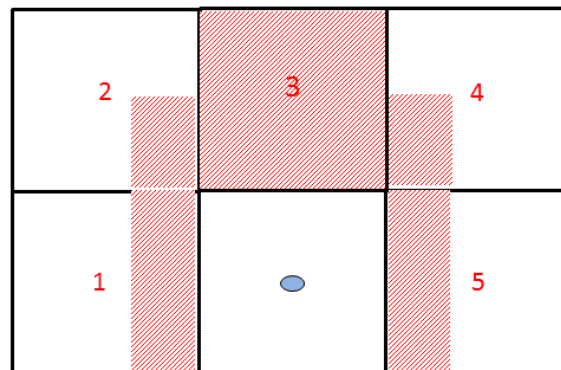


Figura 5.28 – Escenario F: Vista desde arriba de la distribución de los edificios.

Con el planteamiento de este escenario buscamos acercarnos a lo que sería una distribución de bloques de apartamentos o viviendas más realista. Se estudiará, por tanto, el efecto de la interferencia de usuarios de edificios colindantes distribuidos como se muestra en la Figura 5.28. La interferencia de los edificios laterales (edificios 1 y 5) ya se ha estudiado en escenarios anteriores por lo que ahora sólo tendremos que analizar la interferencia de los edificios posteriores (edificios 2, 3 y 4). Todos ellos tienen características idénticas a las de nuestro edificio y por tanto, contarán con tres puntos de acceso FAP en su interior.

La zona sombreada de la Figura 5.28 representa la zona que se ha tenido en cuenta a la hora de calcular la interferencia por considerar que es donde se origina la mayor parte de ella.

En cuanto al edificio posterior (edificio 3), por simplicidad en el cálculo, se ha estudiado la interferencia originada por los usuarios de las tres plantas servidas por la femtocelda central que serán los más próximos a nuestra femtocelda y que por tanto, provocarán la máxima interferencia. La zona considerada para el cálculo de la interferencia se muestra en la Figura 5.29 y la vista desde arriba de la planta central del edificio 3 aparece representada en la Figura 5.30.

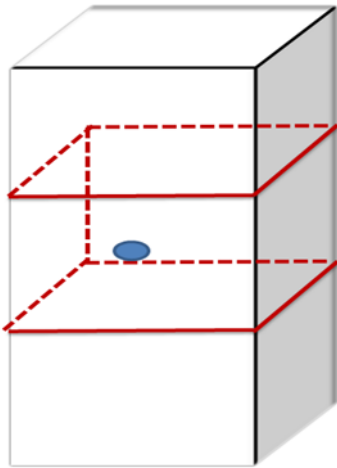


Figura 5.29 – Zona de interferencia del edificio 3

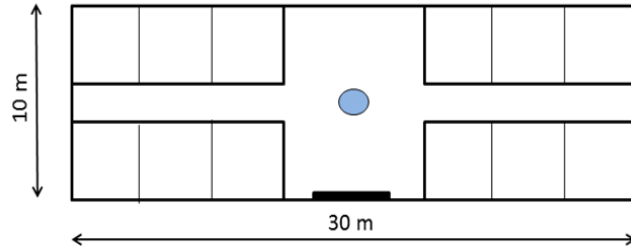


Figura 5.30 – Vista desde arriba de la planta central

Por otro lado, el efecto interferente de los edificios de las esquinas (edificios 2 y 4) se ha simplificado asumiendo que la mayor parte de la interferencia provendrá de los usuarios situados en las habitaciones más cercanas al edificio central, es decir la zona que aparece sombreada en la figura.

Resultados y conclusiones

Las figuras que se muestran a continuación recogen las capacidades obtenidas para los servicios de datos, voz y conjunto para una probabilidad de desbordamiento dada y un valor de coeficiente de correlación de 0.5.

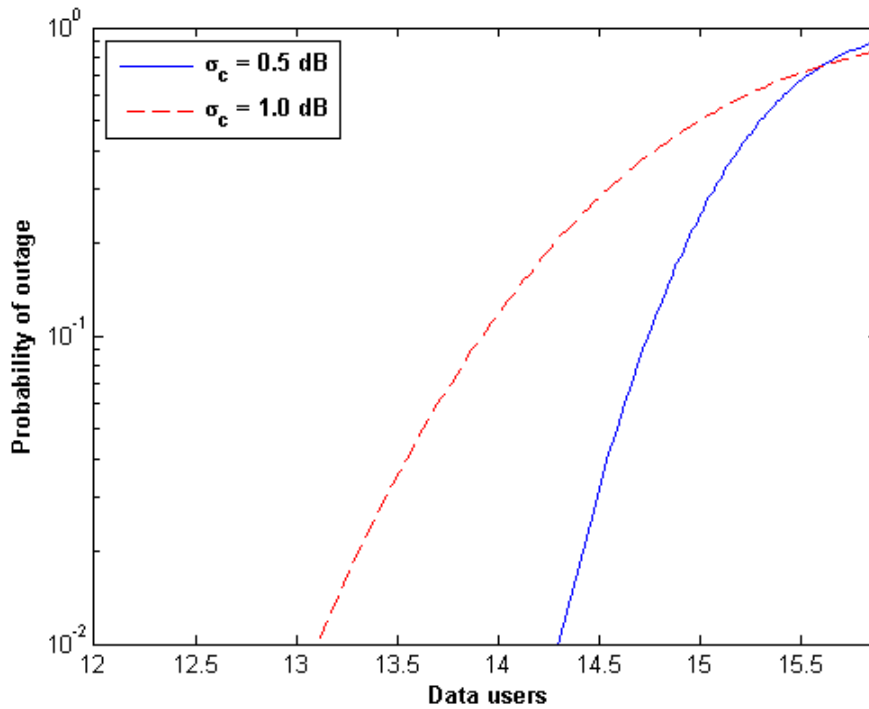


Figura 5.31 – Escenario F: Capacidad del servicio de datos - $L_{fachada} = 12$ dB

El valor obtenido en la simulación para la potencia de transmisión de voz es en este caso de 17.75 dBm

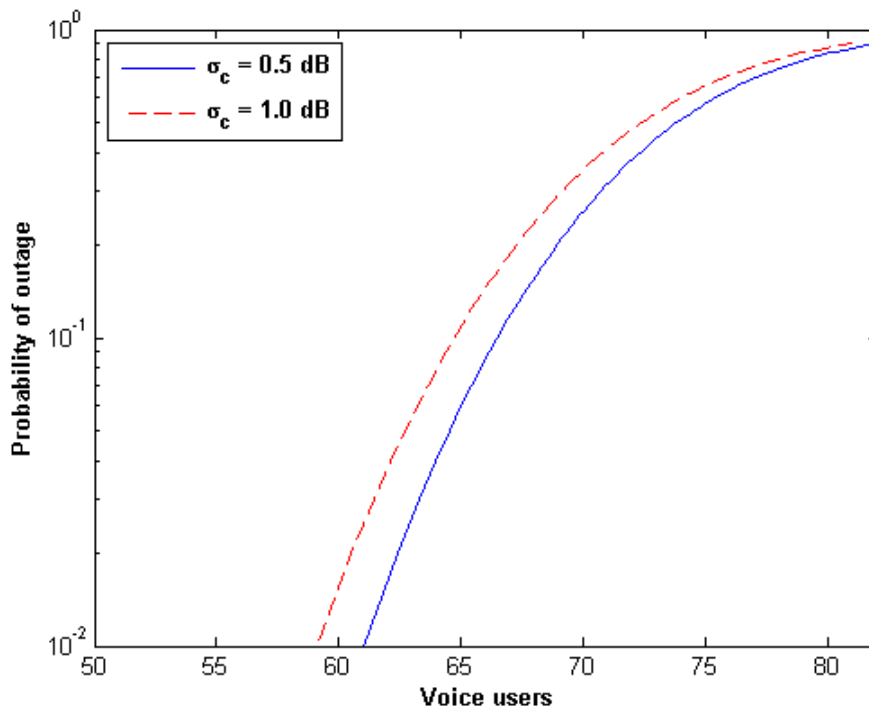


Figura 5.32 – Escenario F: Capacidad del servicio de voz - $L_{fachada} = 12$ dB

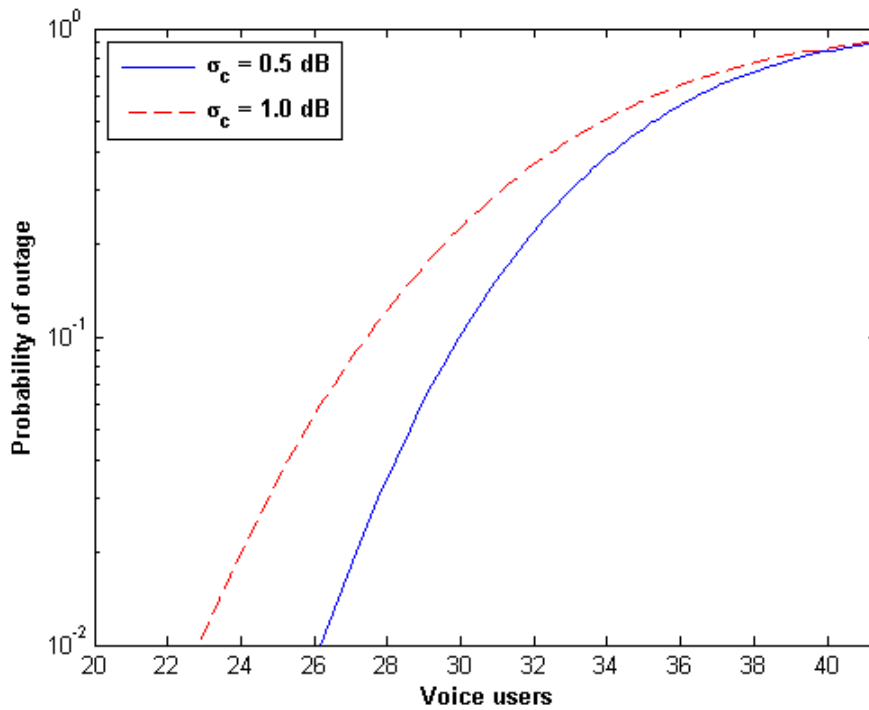


Figura 5.33 – Escenario F: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ - $L_{\text{fachada}} = 12$ dB

La Tabla 5.16 muestra los resultados para la capacidad uplink obtenidos en este escenario para una probabilidad de desbordamiento del 1% y para dos valores de pérdidas por fachada distintos.

Tabla 5.16 – Escenario F Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% - Distintas fachadas ladrillo

σ_c (dB)	$L_{\text{fachada}} = 12$ dB			$L_{\text{fachada}} = 10$ dB		
	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ datos	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ datos
0.5	14.31	61.04	26.92	13.97	59.72	25.57
1	13.10	59.08	23.53	12.81	57.81	22.23

Mientras que en el escenario E se producía una bajada inferior al 1%, en este caso se sitúa en torno al 3% para los servicios de voz y datos para edificios con pérdidas por fachada de 12 dB. En cuanto al servicio de datos más voz en el escenario anterior la bajada era del 1.7% y en este nuevo escenario sube hasta el 3.1%. Para fachadas menos gruesas la bajada es algo mayor debido a que los usuarios sufrirán unas pérdidas por penetración menores.

5.2.8 Extensión escenario F: Estudio con edificios de cristal.

Descripción y objetivos

El esquema de este nuevo escenario es el que se muestra en la Figura 5.34 de abajo:

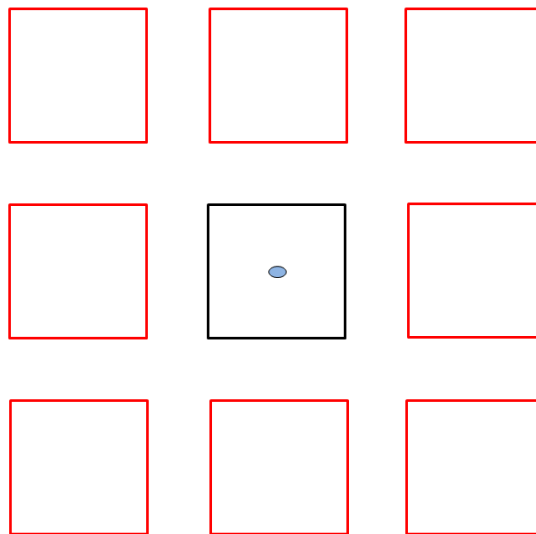


Figura 5.34 – Extensión Escenario F: Vista desde arriba de la distribución de los edificios

Se plantea esta extensión del escenario F como respuesta a una posible situación en la que tengamos un entorno con edificios acristalados de oficinas con una distribución como la que se muestra en la figura superior. Así, podremos acercarnos más a una situación real en la que varios edificios de oficinas cercanos hagan uso de sistemas femtocelda.

Resultados y conclusiones

En la Figura 5.35, Figura 5.36 y Figura 5.37 aparecen los resultados obtenidos para el servicio de datos, voz y conjunto respectivamente para dos distancias de separación entre edificios. Todos los cálculos se han realizado para un coeficiente de correlación de 0.5 y pérdidas por fachada de 6 dB al tratarse de edificios de cristal.

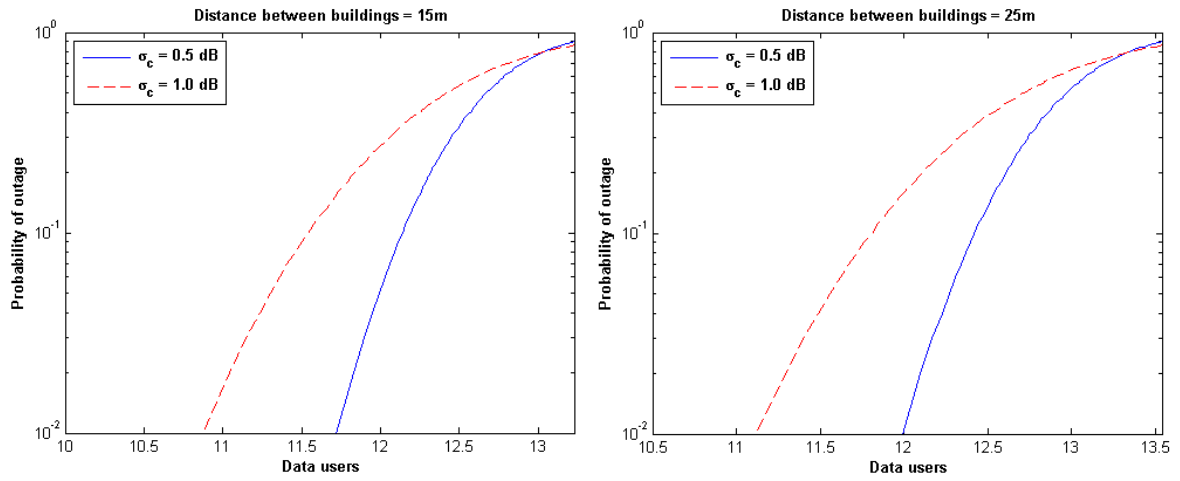


Figura 5.35 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de datos – Distancia entre edificios

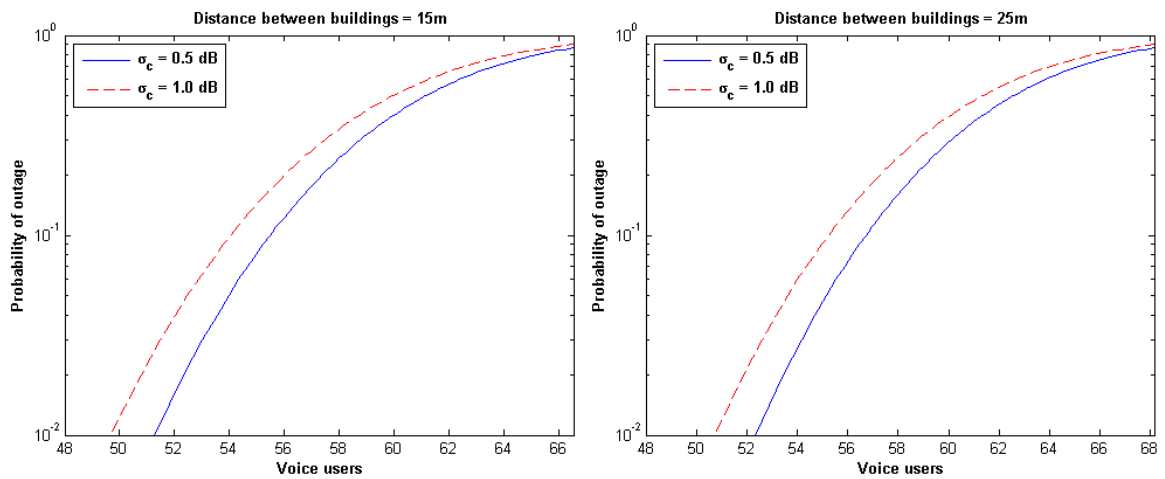


Figura 5.36 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de voz – Distancia entre edificios

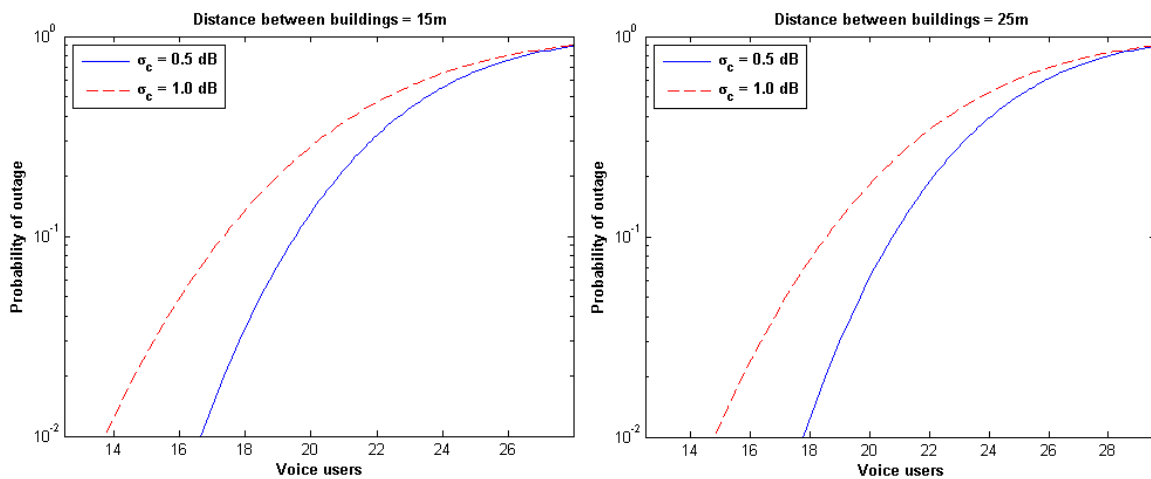


Figura 5.37 – Extensión Escenario F: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 7$ – Distancia entre edificios

A simple vista se puede ver que la separación entre edificios tendrá que tenerse muy en cuenta ya que influye notablemente en la capacidad femtocelda al verse mitigada la interferencia por el efecto de la distancia.

Tabla 5.17 – Extensión Escenario F: Capacidad uplink para una probabilidad de desbordamiento del 1% -

Distancia entre edificios

σ_c (dB)	Distancia entre edificios 15m			Distancia entre edificios 25m		
	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ datos	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 7$ datos
0.5	11.72	51.25	16.63	11.99	52.35	17.77
1	10.87	49.66	13.71	11.11	50.72	14.80

En un escenario como este, con 8 edificios de cristal cercanos, la interferencia originada por todos ellos comienza a ser considerable. Las mayores bajadas se dan como era de esperar para el escenario en el que los edificios se encuentran más juntos. Si comparamos los resultados con los de un único edificio, se producen bajadas en torno al 19.3% y 17.2% para los servicios de datos y voz respectivamente, mientras que si el servicio prestado es de voz y datos simultáneamente la bajada se sitúa en torno al 40%.

Con este análisis vemos cómo el despliegue de sistemas femtocelda en escenarios en los que entren en juego edificios de cristal es más crítico que con edificios de ladrillo ya que el rendimiento de la femtocelda se ve bastante afectado por la inserción de nuevos puntos de acceso en sus alrededores.

5.3 Escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal

Descripción y objetivos

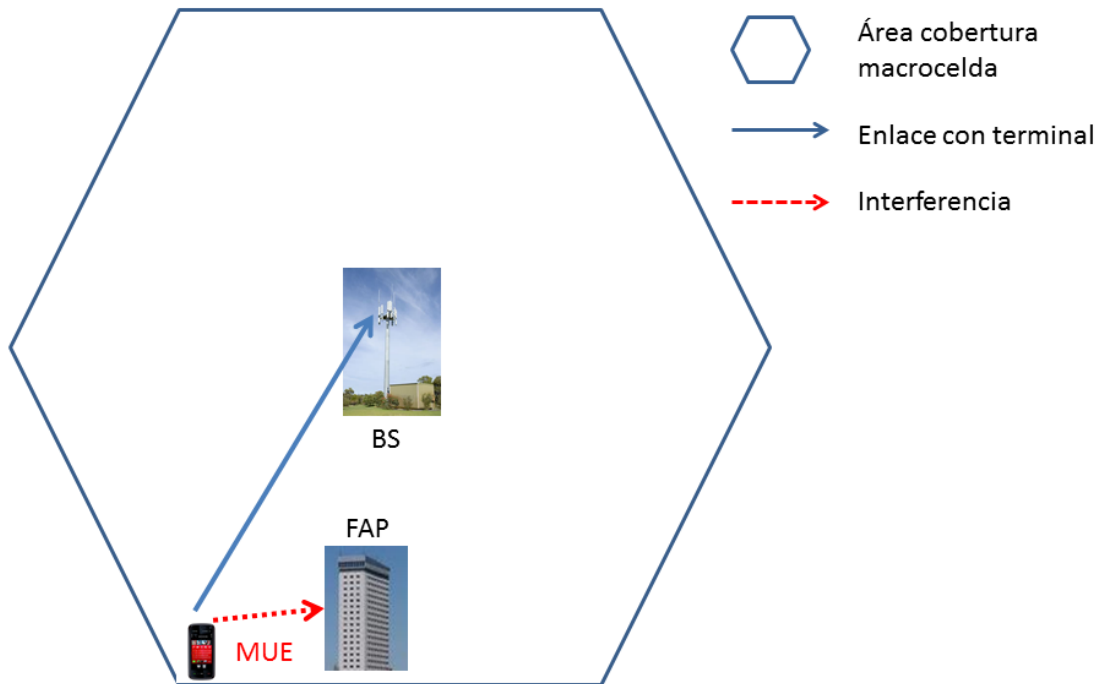


Figura 5.38 –Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace ascendente

Como vimos en el capítulo 3, el uso del control de potencia en sistemas WCDMA puede hacer que usuarios situados en el borde de cobertura macrocelda interfieran en sistemas femtocelda cercanos. Esto se debe a que estos usuarios al estar en el límite del radio de cobertura reciben una señal de piloto débil procedente de la estación base lo que hace que transmitan con la máxima potencia. En esta situación la interferencia sobre sistemas cercanos que trabajen en la misma banda de frecuencias, como pueden ser las femtoceldas que estamos estudiando, será máxima. Por este motivo, el estudio de este escenario es crítico a la hora de pensar en el despliegue de puntos de acceso femtocelda.

Para el análisis de este escenario, previamente se ha hecho una estimación de la densidad de usuarios macrocelda que podría haber alrededor de nuestro edificio.

Si partimos de la suposición de que en media una macrocelda puede servir a 100 usuarios de voz y que el radio de cobertura es de 500 m, tendremos una densidad de usuarios igual a:

$$d = \frac{2.6R^2}{N_u} = 6500 \text{ m}^2/\text{usuario}$$

Por otro lado si consideremos que los usuarios se distribuyen uniformemente en un área circular, el radio de dicha área vendrá dado por:

$$R = \sqrt{A/\pi} \approx 45 \text{ m}$$

Por tanto, con estos datos podemos hacer una estimación de la distribución de los usuarios macrocelda entorno a nuestro edificio. Si suponemos que el centro del área circular está en el centro del edificio tendremos el primer usuario a 45m (R) y el segundo se situará a 135 m (3R).

Con las suposiciones del análisis anterior se plantean tres casos de estudio para ver cómo afecta la distancia entre usuarios MUE y el edificio donde se encuentre la femtocelda bajo estudio, siempre considerando que el usuario macrocelda se encuentra en el límite de cobertura macrocelda.

- **Caso 1:** Usuarios macrocelda distribuidos uniformemente a 10 m del edificio con cobertura femtocelda. Aunque no se haya comentado este caso anteriormente, con este primer análisis se busca estudiar una situación extrema. Se buscará el efecto que ejercen uno y cuatro usuarios de datos en la capacidad femtocelda y en el caso de usuarios de voz se añadirán dos casos más con 12 y 36 usuarios interferentes ya que siempre tendremos una mayor densidad de usuarios de voz que de datos.
- **Caso 2:** Un usuario de datos macrocelda y 4 usuarios para el caso del servicio de voz situados a 45 m del edificio para ver el efecto de la distancia en la capacidad de la femtocelda.
- **Caso 3:** Se añade al caso anterior un usuario a 135 m del edificio para ver el efecto que provocan usuarios bastante alejados del edificio

La femtocelda desplegada tiene una configuración de grupo cerrado, es decir el punto de acceso tiene limitado el servicio a un número determinado de usuarios autorizados por lo que los usuarios macrocelda no se podrán conectar a ella y toda la señal procedente de estos usuarios será tratada como interferencia.

En la Tabla 5.18 se resumen los parámetros generales utilizados en el balance de enlace.

Tabla 5.18 – Parámetros para el balance de enlace

Parámetro	Valor	Unidades	Comentarios
f	1920	MHz	Enlace ascendente
Potencia transmitida MUE	Voz	19	P_{tx_MUE}
	Datos	23	
Potencia transmitida FUE	Voz	17.5	P_{tx_FUE}
	Datos	23	
Ganancia MUE	0	dBi	G_{MUE}
Ganancia FUE	0	dBi	G_{FUE}
Ganancia FAP	0	dBi	G_{FAP}
Radio de cobertura	500	m	R_{macro}
Distancia MUE a macro nodo B	500	m	
Distancia MUE a edificio	10	m	d
	45		
	135		
Altura femtocelda	15	m	h_f
Altura de antena de usuario MUE	1.5	m	h_u

En la simulación de este escenario se ha utilizado el modelo Multi-Pared para el cálculo de las pérdidas del enlace MUE-Femtocelda adaptando el coeficiente de propagación a cada uno de los casos y para el cálculo de los estadísticos de interferencia, las ecuaciones explicadas en el capítulo 4, apartado 4.6.1. En la Tabla 5.19 se recogen los parámetros considerados para el modelo de propagación en cada uno de los casos planteados.

Tabla 5.19 – Parámetros modelo de propagación para el enlace MUE-Femtocelda

Modelo de propagación: <i>Modelo Multi-Pared</i>		
$L_p = L_{ref} + n10 \log_{10}(d)_m + k\sigma_{efectivo} + L_{p_interior} + L_{fachada}$		
Parámetro		Valor
L_{ref} (dB)	Pérdidas en el espacio libre a una distancia de 1m	38.24
n	distancia MUE-Edificio < 135m	2
	distancia MUE-Edificio > 135m	3
d (m)	Distancia entre MUE-Femtocelda	
k	Margen de desvanecimiento por sombra del 90%	1.28
σ_{efectivo}	$\sqrt{(\sigma_{interior} - \sigma_{exterior})^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_{interior} \cdot \sigma_{exterior}}$	3.61
	σ _{interior}	3
	σ _{exterior}	4
L_{p_interior} (dB)	L _{pared}	6.9
	L _{planta}	18.3
L_{fachada} (dB)	Ladrillo	10
		12
	Cristal	6

5.3.1 ESCENARIO A.1: Estudio de la capacidad de datos femtocelda en edificios de ladrillo y cristal con interferencia macrocelda

En este escenario se va estudiar cómo interfiere el enlace ascendente de un usuario MUE usando un servicio de datos o voz en el enlace ascendente de un equipo usuario femtocelda de datos y cómo repercute en la capacidad de nuestra femtocelda.

Resultados caso 1: Usuarios MUE a 10m del edificio con cobertura femtocelda

A continuación se presentan los resultados para el caso en el que usuarios macrocelda interfieren haciendo uso de un servicio de datos. Se muestra la capacidad de datos femtocelda tanto para edificios de ladrillo como de cristal.

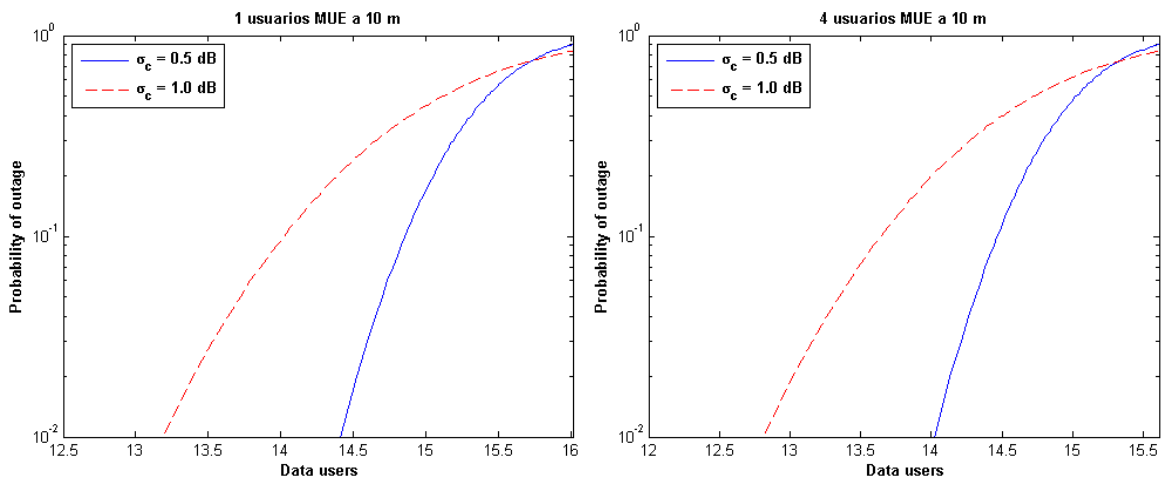


Figura 5.39 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 12$ dB

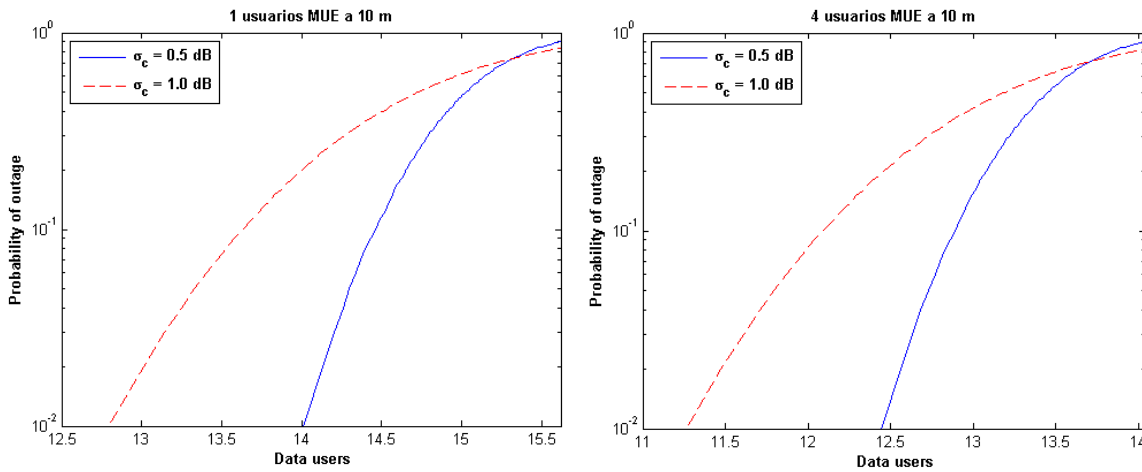


Figura 5.40: Capacidad del servicio de datos – Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 6$ dB

Tabla 5.20 – Escenario A.1. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuario MUE de datos.

Nº usuarios MUE de datos a 10m	σ_c (dB)	Edificio de ladrillo $L_{fachada} = 12$ dB	Edificio de cristal $L_{fachada} = 6$ dB
0	0.5	14.53	
	1	13.30	
1	0.5	14.41	14.02
	1	13.18	12.79
4	0.5	14.02	12.44
	1	12.81	11.26

Se observa que la interferencia originada por un único usuario de datos macrocelda no llega a un usuario de bajada en la capacidad (<1%) sin embargo, con 4 usuarios la bajada sube a un 3.5% en edificios de ladrillo. Por otro lado, la interferencia en edificios de cristal de un usuario MUE es comparable a la que originan 4 usuarios en un edificio de ladrillo, mientras que si tenemos 4 usuarios MUE cercanos a un edificio de cristal, la bajada es de 14.5% y podría llegar a ser significativa si hubiera más de 4 usuarios alrededor del edificio. Sin embargo, esta situación es poco probable ya que es difícil que 4 usuarios o más estén haciendo uso de un servicio de datos cerca de nuestro edificio.

A continuación se va a estudiar la interferencia macrocelda pero de usuarios en este caso realizando una llamada de voz. Para este análisis, como ya se comentó anteriormente, se va a tomar un rango más amplio para el posible número de usuarios macrocelda que se encuentren en las cercanías de nuestro edificio debido a que es más probable que la densidad de usuarios utilizando un servicio de voz sea mayor que la de datos.

La Figura 5.41 y la Figura 5.42 muestran en este caso los resultados para el caso de 1 y 36 usuarios interferentes de voz que reflejan los dos extremos. En la Tabla 5.21 se recogen los resultados obtenidos para una probabilidad de desbordamiento del 1% de la capacidad femtocelda en función del número de usuarios MUE interferentes.

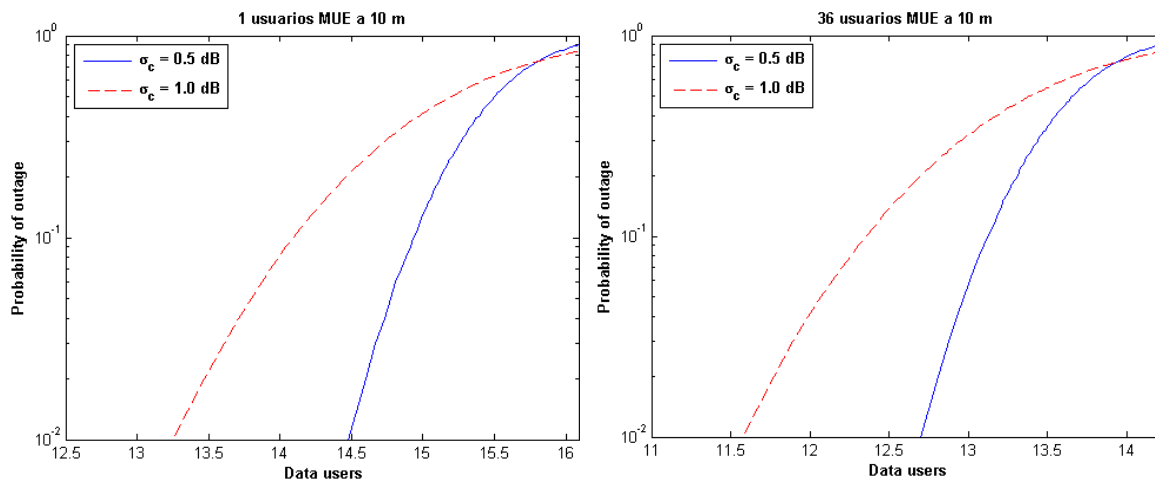


Figura 5.41 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE voz – $L_{\text{fachada}} = 12$ dB

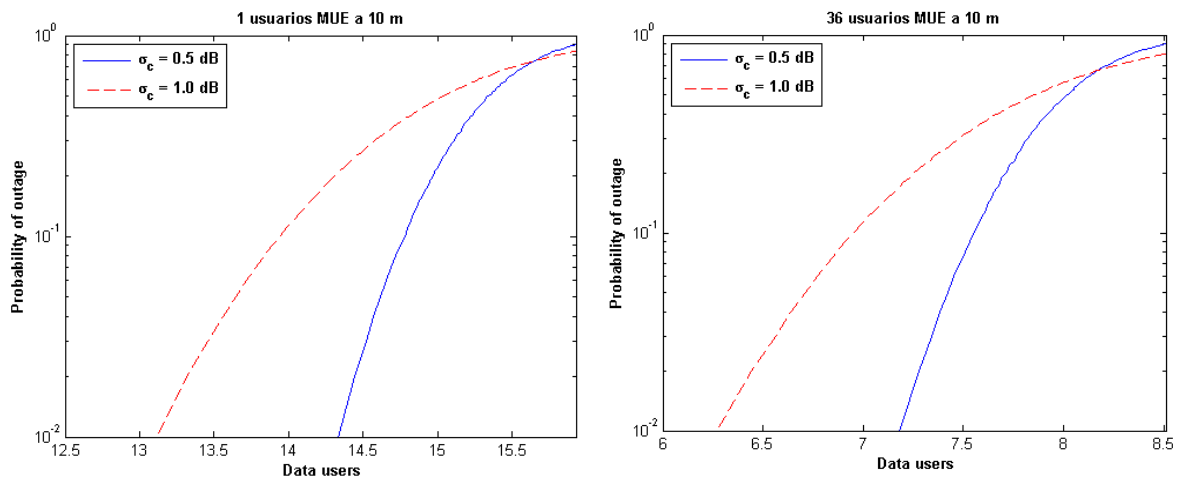


Figura 5.42 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos– Usuarios MUE voz – $L_{fachada} = 6$ dB

Tabla 5.21 – Escenario A.1. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE de voz

Nº usuarios MUE de voz a 10m	σ_c (dB)	Edificio de ladrillo ($L_{fachada} = 12$ dB)	Edificio de cristal ($L_{fachada} = 6$ dB)
0	0.5	14.53	
	1	13.30	
1	0.5	14.48	14.33
	1	13.25	13.11
4	0.5	14.33	13.72
	1	13.11	12.52
12	0.5	13.92	12.08
	1	12.72	10.95
36	0.5	12.70	7.18
	1	11.57	6.27

En este caso, la interferencia se puede considerar nula en el caso de edificios de ladrillo ya que no se producen bajadas de más de un usuario salvo en el caso que tengamos una densidad alta de usuarios de voz alrededor del edificio con bajadas del 12.6%. Sin embargo, en escenarios con edificios de cristal se tendrá que tener más cuidado ya que las caídas pueden llegar a ser significativas si tenemos más de 12 usuarios de voz macrocelda, llegando a superar los 6 usuarios de bajada en el caso de 36 usuarios interferentes lo que se corresponde con una bajada del 50.5%.

A continuación, se muestran una serie de gráficas que reflejan mejor cuál es el comportamiento de los sistemas femtocelda en presencia de interferencia macrocelda de usuarios de voz. En la primera de ellas se plasma la capacidad para los dos valores de desviación estándar de control de potencia tanto en un despliegue doméstico como en un escenario de oficina. El radio de cobertura macrocelda es en este caso de 500 m.

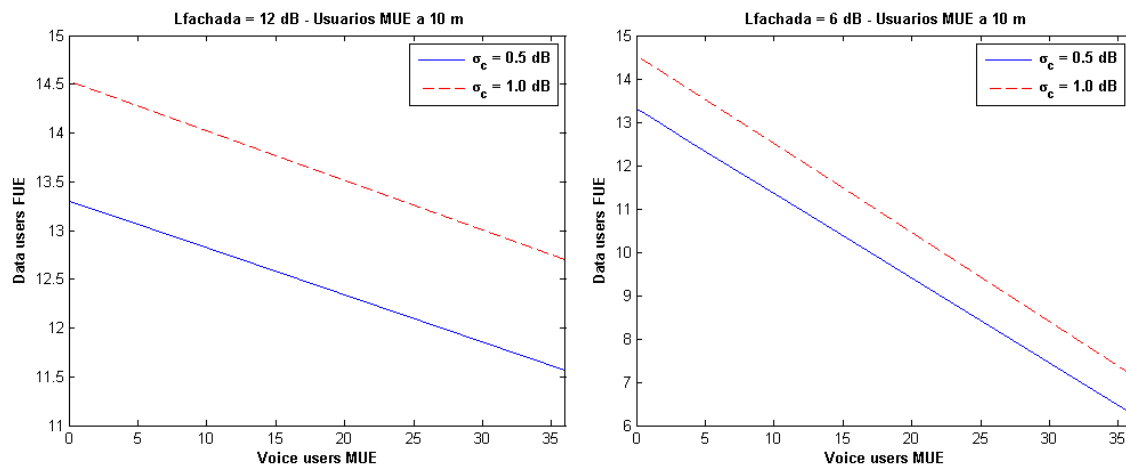


Figura 5.43 – Escenario A.1: Capacidad del servicio de datos en función del número de usuarios MUE de voz

Se observa en esta otra representación de los datos cómo la bajada en edificios de cristal es mucho más acentuada que en el caso de ladrillo debido a las menores pérdidas por penetración que presentan estos edificios

Por tanto, se deberá tener especial cuidado con la interferencia de enlaces ascendentes de usuarios macrocelda a la hora de instalar una femtocelda sobre todo si se hace en edificios acristalados debido a sus características que hacen que la interferencia sea mayor.

Resultados caso 2: Usuarios MUE a 45m del edificio con cobertura femtocelda.

En este otro caso se va a estudiar la interferencia originada por usuarios macrocelda situados a 45m del edificio con cobertura femtocelda. En este nuevo supuesto, sólo estudiaremos la interferencia originada por un usuario MUE que esté haciendo uso del servicio de datos proporcionado por su operador y por otro lado el efecto de 4 usuarios realizando una llamada de voz.

Tabla 5.22 – Escenario A.1. Caso 2: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE.

Nº usuarios MUE a 45m		σ_c (dB)	Edificio de ladrillo ($L_{fachada} = 12dB$)	Edificio de cristal ($L_{fachada} = 6dB$)
	0	0.5	14.53	
		1	13.30	
Datos	1	0.5	14.51	14.44
		1	13.28	13.22
Voz	4	0.5	14.50	14.39
		1	13.27	13.17

Para el caso en el que nos encontramos, el efecto de usuarios macrocelda a 45m del edificio tanto de voz como de datos es casi nulo incluso para el caso de un edificio de cristal. Además, se observa que la interferencia que provoca un solo usuario de datos es comparable a la de 4 usuarios de voz.

Por lo tanto, la interferencia macrocelda se puede reducir a la que originan los usuarios que se encuentren muy próximos al edificio (Caso1).

Resultados caso 3: Usuarios MUE a 135m del edificio con cobertura femtocelda

En la Tabla 5.23 además de los resultados obtenidos en este último caso se muestra la capacidad obtenida en el Caso 2 para un usuario MUE de datos a 45 m.

Tabla 5.23 – Escenario A.1. Caso 3: Capacidad uplink del servicio de datos en función del número de usuarios MUE

	σ_c (dB)	Edificio de ladrillo ($L_{fachada} = 12\text{dB}$)	Edificio de cristal ($L_{fachada} = 6\text{dB}$)
Nº usuarios MUE: 0	0.5	14.53	
	1	13.30	
1 usuario MUE de datos a 45m	0.5	14.51	14.44
	1	13.28	13.22
1 usuario MUE de datos a 45m + 1 usuario MUE de datos a 135m	0.5	14.51	14.44
	1	13.28	13.22

Se puede ver en la tabla superior que el efecto de usuarios a 135 m de la vivienda con cobertura femtocelda es inapreciable ya que no se produce variación en la capacidad. Por tanto, aunque estos usuarios estén transmitiendo con la máxima potencia disponible y originando de este modo una interferencia máxima, su efecto sobre la capacidad será nulo.

Por tanto, considerando sólo los usuarios en un radio de 50 m alrededor de nuestro edificio podemos decir que estamos incluyendo la mayor parte de la interferencia macro.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en este caso, se ha omitido el estudio de la interferencia provocada por usuarios MUE de voz ya que como se ha visto, el efecto de usuarios a 135 m es nulo y en el caso de usuarios de voz se espera que sea aún menor por lo estudiado hasta ahora.

5.3.2 ESCENARIO A.2: Estudio de la capacidad de voz femtocelda en edificios de ladrillo y cristal con interferencia macrocelda

Ahora, en este nuevo escenario se va a llevar a cabo el mismo análisis que en el escenario anterior pero en este caso sobre la capacidad del servicio de voz. Es decir, se va a estudiar cómo interfiere el enlace ascendente de usuarios MUE usando un servicio de datos o

voz en el enlace ascendente de un equipo usuario femtocelda pero esta vez mostrando los resultados para el servicio de voz prestado por la femtocelda.

Resultados caso 1: Usuarios MUE a 10m del edificio con cobertura femtocelda

Las Figura 5.44 y la Figura 5.45 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la probabilidad de desbordamiento para los casos en los que tengamos 1 o 4 usuarios MUE haciendo uso de un servicio de datos ofrecido por su operador macrocelda para edificios de ladrillo y cristal respectivamente.

Por otro lado, en la Tabla 5.24 aparecen los resultados obtenidos para una probabilidad de desbordamiento del 1%.

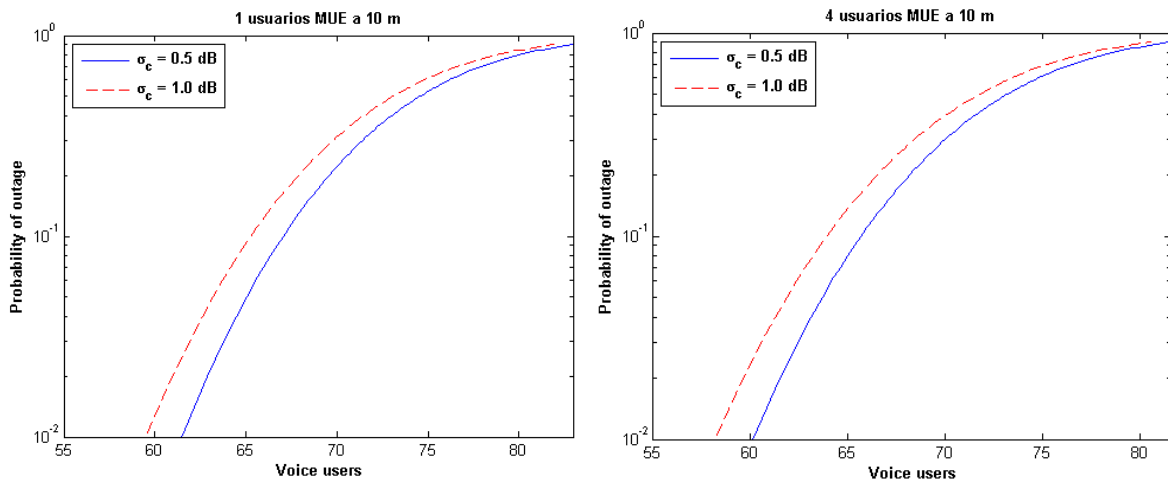


Figura 5.44 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 12$ dB

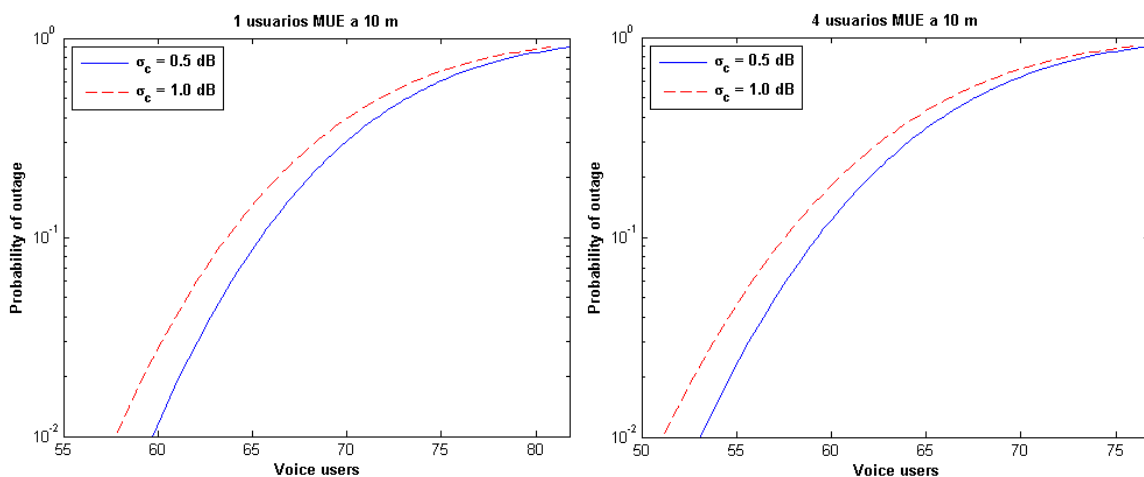


Figura 5.45 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE datos – $L_{fachada} = 6$ dB

Tabla 5.24 – Escenario A.2. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de voz para una probabilidad de desbordamiento del 1 % en función del número de usuario MUE de datos.

Nº usuarios MUE de datos a 10m	σ_c (dB)	Edificio de ladrillo $L_{fachada} = 12\text{dB}$	Edificio de cristal $L_{fachada} = 6\text{dB}$
0	0.5	61.90	
	1	59.94	
1	0.5	61.48	59.70
	1	59.49	57.72
4	0.5	60.10	53.05
	1	58.15	51.10

Al igual que ocurría con el servicio de datos el hecho de tener un único usuario de datos cerca de un edificio de ladrillo no supone ni un 1% de bajada en la capacidad de voz y si el número de usuarios interferentes aumenta a 4 no llega al 3%. Por otro lado, el comportamiento del sistema en edificios de cristal es también similar al caso del servicio de voz con bajadas en torno al 14% en el peor de los casos que supone la pérdida de 8 conexiones de voz.

A continuación se va a estudiar la interferencia macrocelda pero de usuarios en este caso realizando una llamada de voz. La Figura 5.46 y la Figura 5.47 muestran los resultados para el caso de 1 y 36 usuarios interferentes para ver los dos extremos. En la Tabla 5.25 se recogen los resultados obtenidos para una probabilidad de desbordamiento del 1% de la capacidad femtocelda en función del número de usuarios MUE interferentes.

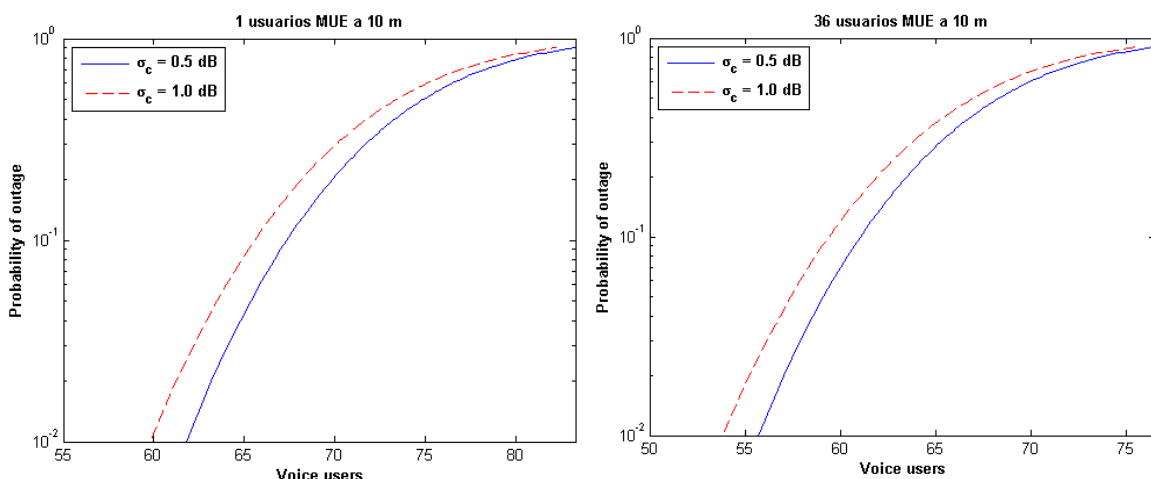


Figura 5.46 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE voz – $L_{fachada} = 12$ dB

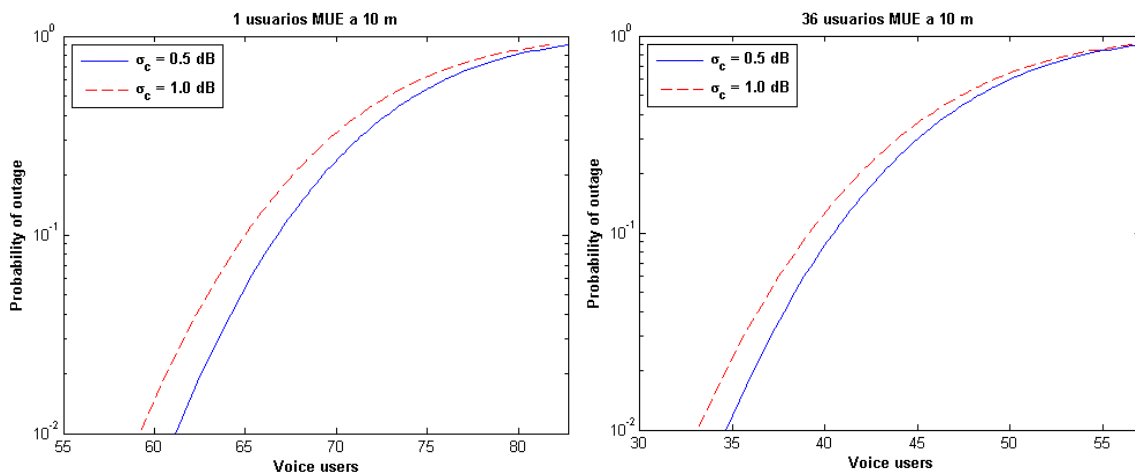


Figura 5.47 – Escenario A.2: Capacidad del servicio de voz– Usuarios MUE voz – $L_{\text{fachada}} = 6 \text{ dB}$

Tabla 5.25 – Escenario A.2. Caso 1: Capacidad uplink del servicio de voz en función del número de usuario

MUE de voz.

Nº usuarios MUE de voz a 10m	σ_c (dB)	Edificio de ladrillo $L_{\text{fachada}} = 12\text{dB}$	Edificio de cristal $L_{\text{fachada}} = 6\text{dB}$
0	0.5	61.93	
	1	59.94	
1	0.5	61.76	61.17
	1	59.77	59.20
4	0.5	61.24	58.90
	1	59.26	56.96
12	0.5	59.84	52.83
	1	57.90	50.98
36	0.5	55.67	34.62
	1	53.83	33.06

En este caso en edificios de ladrillo no se da una bajada de al menos un usuario hasta que el número de usuarios MUE de voz no es de 12 lo que se corresponde con una bajada del 3.33%. Si damos el salto de 12 a 36 usuarios, entonces si es apreciable la bajada que se produce en la capacidad, 6 usuarios menos que en el caso de no tener interferencia macrocelda (6.23%).

En el caso de edificios acristalados con 4 usuarios cercanos comunicándose con su macrocelda ya se producen bajadas que llegan a los tres usuarios, reduciéndose la capacidad hasta en más de 25 usuarios lo que se corresponde con un 44% de bajada en el caso de tener 36 usuarios MUE. Con este caso queda de manifiesto la influencia que tienen los equipos usuario macrocelda en sistemas femtocelda instalados en el interior de edificios de cristal. Además, se trata de una situación bastante probable en zonas financiero/económicas en las que la existencia de este tipo de edificios es muy común y en la que además la densidad de usuarios pueda acercarse a los valores más altos que hemos estudiado.

En esta última tabla se recogen los valores obtenidos para la capacidad de un servicio simultáneo de voz y datos. Se ha estudiado únicamente la interferencia de 4 usuarios macrocelda usando los dos servicios disponibles para mostrar una visión general del rendimiento de la femtocelda en este caso.

Tabla 5.26 – Escenario A.2. Caso1: Capacidad del servicio de voz en función del número y tipo de usuarios
MUE – $N_{\text{datos}} = 7$

Nº usuarios MUE a 10 m		σ_c (dB)	Edificio de ladrillo $L_{\text{fachada}} = 12\text{dB}$	Edificio de cristal $L_{\text{fachada}} = 6\text{dB}$
0		0.5	27.80	
		1	24.40	
Datos	4	0.5	25.35	17.88
		1	21.87	13.89
Voz	4	0.5	26.85	23.89
		1	23.40	20.35

La mayor bajada (35.7%), como era de esperar, se produce para el caso de edificios acristalados y una interferencia de 4 usuarios de datos.

Resultados Casos 2 y 3:

Usuarios MUE a 45m y 135m del edificio con cobertura femtocelda

En este último escenario y para estos dos últimos casos no se van a presentar los resultados obtenidos ya que no aportan ninguna conclusión nueva a las ya presentadas. Como se esperaba en este último análisis, la interferencia de usuarios macrocelda a 45 m o más de nuestro edificio, no es lo suficientemente alta como para reducir en un factor apreciable la capacidad ofrecida por la femtocelda para servicios de voz.

CAPÍTULO 6

6 Capacidad del enlace descendente

6.1 Introducción

En este capítulo, al igual que en el capítulo 5 estudiaremos el despliegue de femtoceldas en edificios de ladrillo y cristal pero en este caso nos centraremos en el análisis del enlace descendente calculando la capacidad de los servicios que puede ofrecer la femtocelda.

Se van a estudiar una serie de escenarios para poder analizar en profundidad el comportamiento de las femtoceldas en distintos entornos. En primer lugar se presentan cuatro escenarios en los que las femtoceldas utilizadas disponen de un canal dedicado por lo que no sufrirán interferencia macrocelda y por último, se plantea el despliegue de femtoceldas compartiendo la misma banda de frecuencias con la red macrocelda cercana.

En todos los escenarios propuestos se va a llevar a cabo un estudio exhaustivo de las posibles interferencias procedentes de otros sistemas y cómo éstas afectan a la capacidad de los servicios.

6.2 Escenarios con femtoceldas de canal dedicado

Los escenarios mostrados a continuación y los edificios que aparecen en ellos tienen las mismas características descritas a lo largo de los escenarios del capítulo 5. Para el análisis del enlace descendente estudiaremos el despliegue de una sola femtocelda sirviendo a tres plantas, la interferencia originada por dos nuevos puntos de acceso instalados en el mismo edificio, la interferencia procedente de los edificios laterales y por último la de los edificios colindantes posteriores.

6.2.1 Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario A es el que se muestra en la Figura 6.1 de abajo:

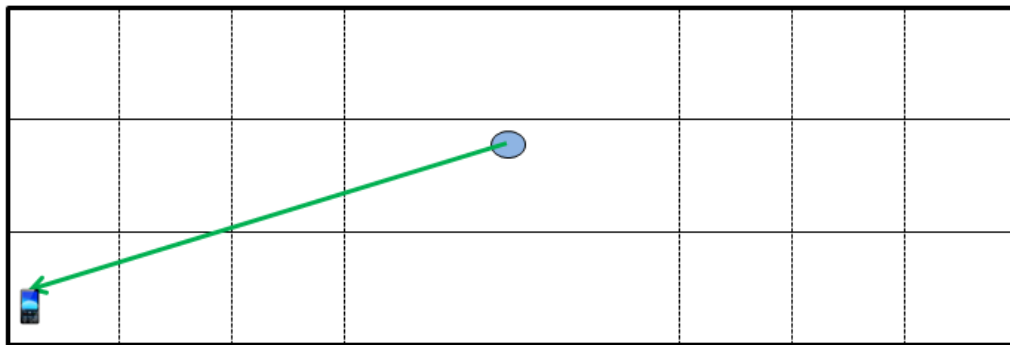


Figura 6.1 – Escenario A: Femtocelda sirviendo a 3 plantas.

En este escenario se va a estudiar la capacidad de la femtocelda para el enlace descendente analizando la interferencia que sufre el usuario con peor cobertura femtocelda, es decir, el situado en la esquina inferior izquierda.

En este caso, en el enlace descendente, no existe varianza de interferencia intracelular ya que el usuario bajo estudio recibe su señal y la señal de interferencia intracelular por el mismo camino. La interferencia intracelular en el enlace descendente vendrá dada por la interferencia entre códigos de usuario que dependerá del factor de ortogonalidad.

El cálculo para la capacidad se ha realizado utilizando las ecuaciones expuestas en el capítulo 4, apartado 4.5.2 para el análisis del enlace descendente y que tienen en cuenta lo explicado anteriormente. En cuanto al modelo de propagación para el cálculo de las pérdidas de enlace dentro del edificio, se ha utilizado el modelo para interiores propuesto, el modelo Multi-pared.

Resultados y conclusiones

Al tratarse del análisis del enlace descendente, será de interés estudiar el efecto que tiene sobre la capacidad el uso de códigos ortogonales ya que como se vio en capítulos anteriores estos son cruciales a la hora de reducir la interferencia entre canales de distintos usuarios. Por tanto, los resultados para la capacidad que se muestran en la Tabla 6.1 se dan para dos valores de factor de ortogonalidad: 0.9 y 0.8. Para el cálculo de la capacidad downlink para el servicio de voz más datos se ha fijado el número de usuarios de datos a un valor igual a la mitad de los códigos de usuario disponibles, esto es 16 usuarios de datos. Los resultados mostrados para este último caso son los que se han obtenido fijando la capacidad máxima al número de códigos, mientras que para el servicio de datos y voz aislados se presentan los valores teóricos sin restricciones por código.

Tabla 6.1 – Escenario A: Capacidad downlink en función del factor de ortogonalidad

φ	N_{datos}	N_{voz}	$N_{\text{voz}} + 16 \text{ datos}$
0.8	340.85 → 32	1584.20 → 256	112.54
0.9	657.36 → 32	3057.10 → 256	560.43 → 256

A la vista de los resultados se observa que la capacidad de la femtocelda para ambos servicios en el enlace descendente es muy elevada, esto se debe en primer lugar a las características de este tipo de escenarios en los que las distancias son muy reducidas y por tanto no se producen unas pérdidas significativas en el nivel de señal recibida, además el hecho de que la relación energía por bit a interferencia sea elevada también favorece que se den estos valores tan elevados de capacidad para ambos servicios.

Por otro lado, los resultados plasman perfectamente el efecto en la capacidad del uso de códigos ortogonales en los sistemas WCDMA. Con un factor de ortogonalidad igual a 0.8 que implica un 20% de interferencia entre códigos de usuario, la capacidad es menor que en el caso en el que se considere una interferencia del 10%. Esto pone de relevancia la importancia de hacer un estudio y planificación exhaustivos de los códigos ortogonales que se van a utilizar ya que repercutirá muy mucho en el comportamiento de nuestro sistema.

Aunque los valores teóricos obtenidos para la capacidad downlink son muy elevados, habrá que tener en cuenta que no se puede dar servicio a más usuarios que códigos ortogonales disponibles. Por tanto, los valores reales para la capacidad siempre que ésta supere el número de códigos disponibles será de 256 usuarios para el servicio de voz y de 32 para el servicio de datos.

6.2.2 Escenario B: Tres femtoceldas en un edificio de 9 plantas

Descripción y objetivos

El esquema del escenario D es el que se muestra en la Figura 6.2 de abajo:

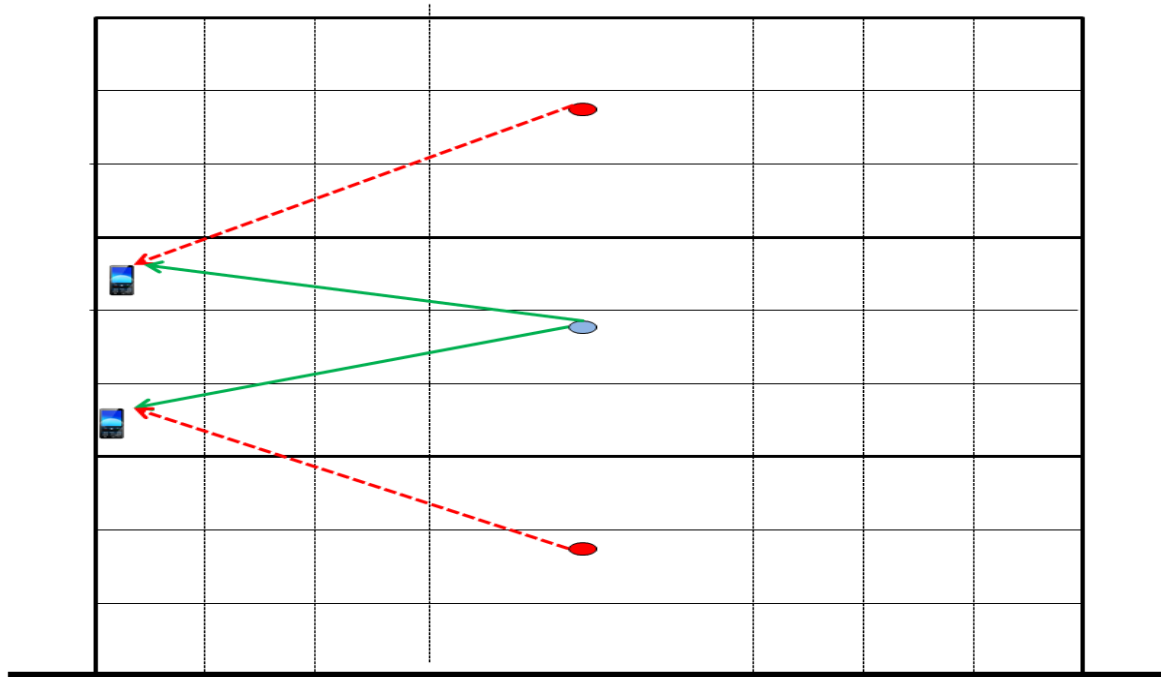


Figura 6.2 – Escenario B: Despliegue de 3 femtoceldas en un edificio de 9 plantas

En este escenario se va a estudiar cómo afecta a la capacidad de nuestra femtocelda la instalación de dos nuevos puntos de acceso de idénticas características en el mismo edificio.

En este nuevo escenario, sí existe esperanza y varianza intercelular ya que el usuario bajo estudio recibe una señal por cada foco interferente, es decir, por cada femtocelda instalada.

Para realizar los cálculos partimos de que los dos nuevos puntos de acceso FAP transmiten con la máxima potencia disponible, es decir, 23 dBm por lo que su interferencia será máxima y su interferencia dependerá por tanto, de la distancia al usuario bajo estudio y al efecto por sombra. Con estas consideraciones podemos calcular los estadísticos de interferencia intercelular como se indica en el capítulo 4, apartado 4.5.2.

Resultados y conclusiones.

La Figura 6.3, la Figura 6.4 y la Figura 6.5 muestran la capacidad del servicio de datos, de voz y conjunto voz más datos para este escenario. Para este último caso, la capacidad de voz se ha calculado fijando el número de usuarios de datos a 16.

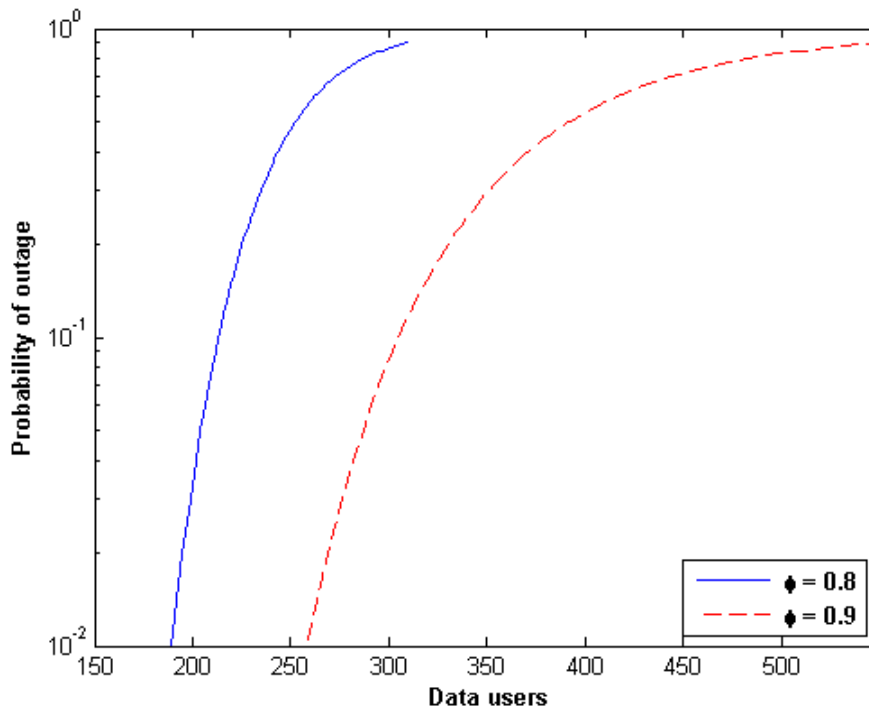


Figura 6.3 – Escenario B: Capacidad del servicio de datos – $C_{dm} = 0.5$

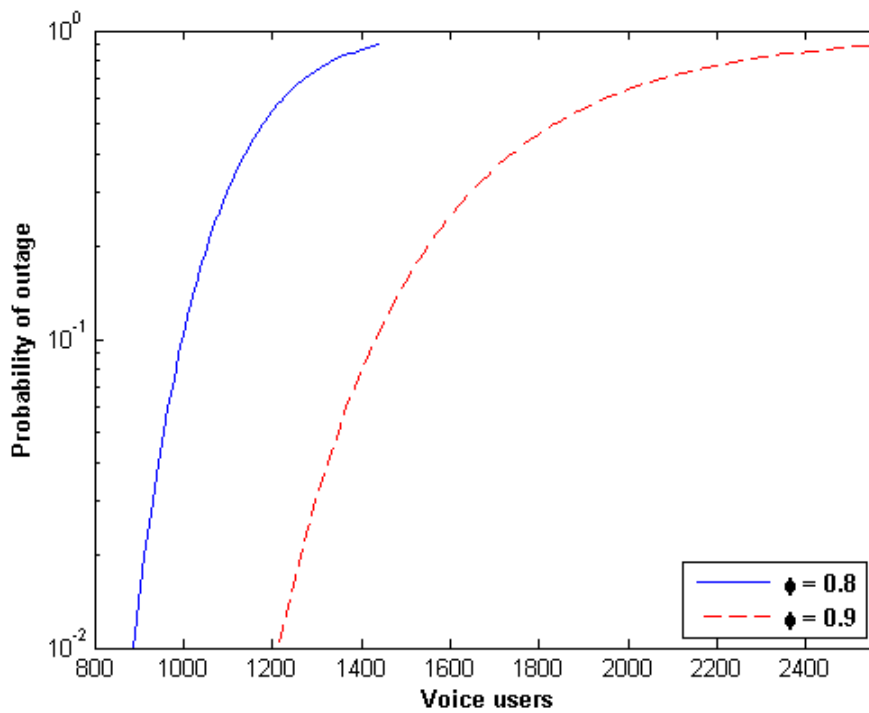


Figura 6.4 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $C_{dm} = 0.5$

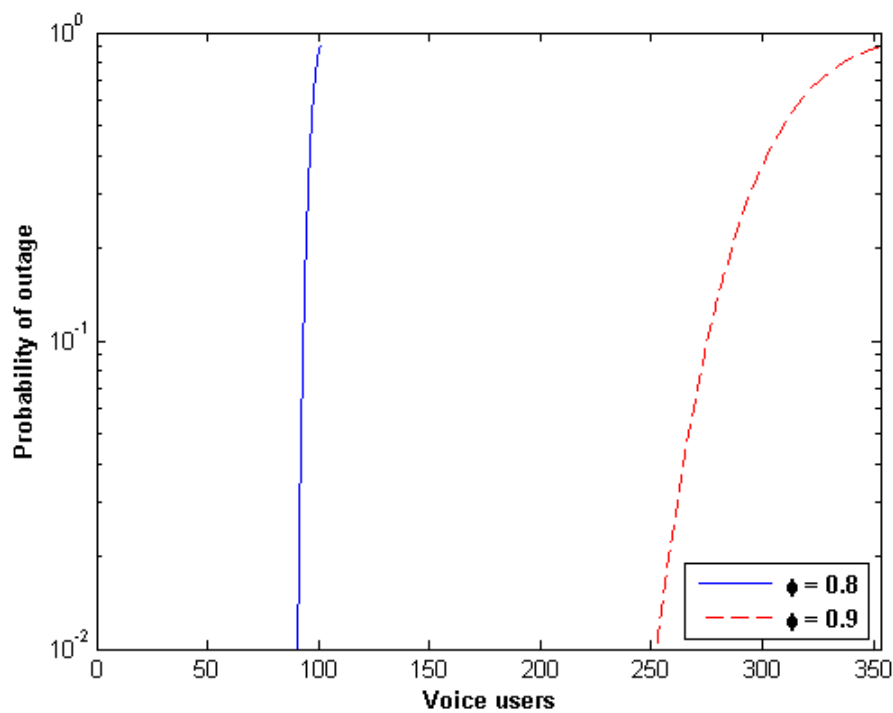


Figura 6.5 – Escenario B: Capacidad del servicio de voz – $N_{datos} = 16$ – $C_{dm} = 0.5$

Si analizamos las gráficas superiores, destacar que en el caso de la capacidad conjunta de voz más datos no se cumple la relación entre las dos gráficas representadas para los dos valores de factor de ortogonalidad debido a que en este caso se han realizado los cálculos con los valores teóricos de capacidad, es decir, con los códigos disponibles para ambos servicios. También se observa que la varianza para el caso de un factor de ortogonalidad de 0.8 es pequeña ya que la media de la interferencia intracelular será más alta en este caso al tener más interferencia entre códigos.

Al igual que se hizo en el escenario análogo a este en el análisis ascendente, en la Tabla 6.2 se presentan los resultados para dos valores de coeficiente de correlación inter-femtoceldas (C_{dm}).

Tabla 6.2 – Escenario B: Capacidad downlink en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación.

φ	N_{datos}		N_{voz}		$N_{\text{voz}} + 16 \text{ datos}$	
	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$
0.8	143.83→32	189.16→32	675.29→256	886.06→256	76.19	90.40
0.9	180.49→32	258.14→32	849.83→256	1212.90→256	166.01	252.50

La mayor bajada se produce, como cabía esperar, en el caso en el que el coeficiente de correlación es 0 ya que la interferencia entre las señales será mayor debido a que el desvanecimiento por sombra será más elevado en este caso. Ahora, si nos centramos en los resultados obtenidos para este caso en concreto, mientras que para una interferencia por código del 20%, la bajada es del 57% para ambos servicios y para un factor de ortogonalidad de 0.9 es del 72%. En cuanto al servicio conjunto se producen bajadas superiores al 30%.

El motivo de que las bajadas sean tan elevadas es que la interferencia intercelular en el enlace descendente es alta ya que al considerar que todas las femtoceldas transmiten con la misma potencia la diferencia entre la señal recibida por el usuario FUE de su femtocelda y la interferencia procedente de otros puntos de acceso será muy pequeña lo que se traduce en una relación señal a interferencia muy baja.

6.2.3 Escenario C: Interferencia edificios adyacentes.

Descripción y objetivos

El esquema del escenario C es el que se muestra en la Figura 6.6

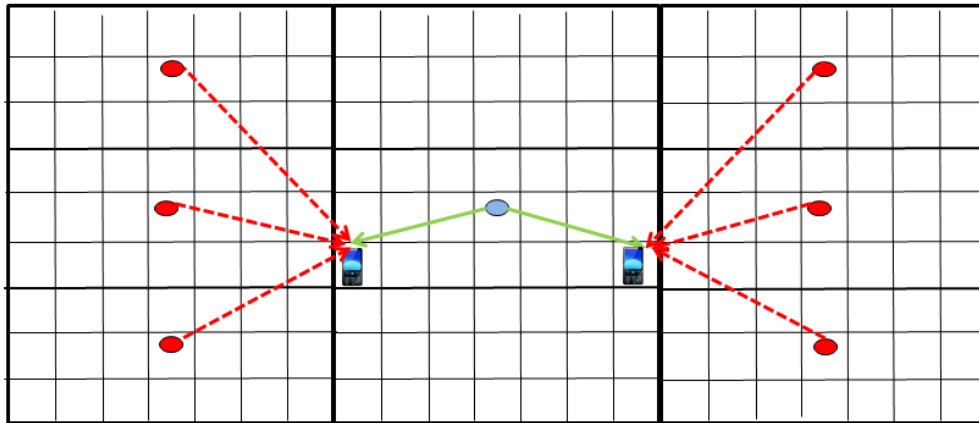


Figura 6.6 – Escenario C: Interferencia edificios laterales

El cálculo para la interferencia en este caso se ha hecho considerando primero sólo un edificio adyacente y por simplicidad se ha supuesto que ambos edificios provocan la misma interferencia en el usuario aunque en realidad esto no sea así debido al efecto de la distancia.

Los cálculos para el cálculo de la interferencia son idénticos a los del escenario anterior. En el caso en el que se consideren edificios de ladrillo se tomará que la distancia entre ellos es de 15 m para estudiar sólo el caso más desfavorable.

Resultados y conclusiones

La Figura 6.7, la Figura 6.8 y la Figura 6.9 muestran la capacidad obtenida en este escenario para los distintos servicios.

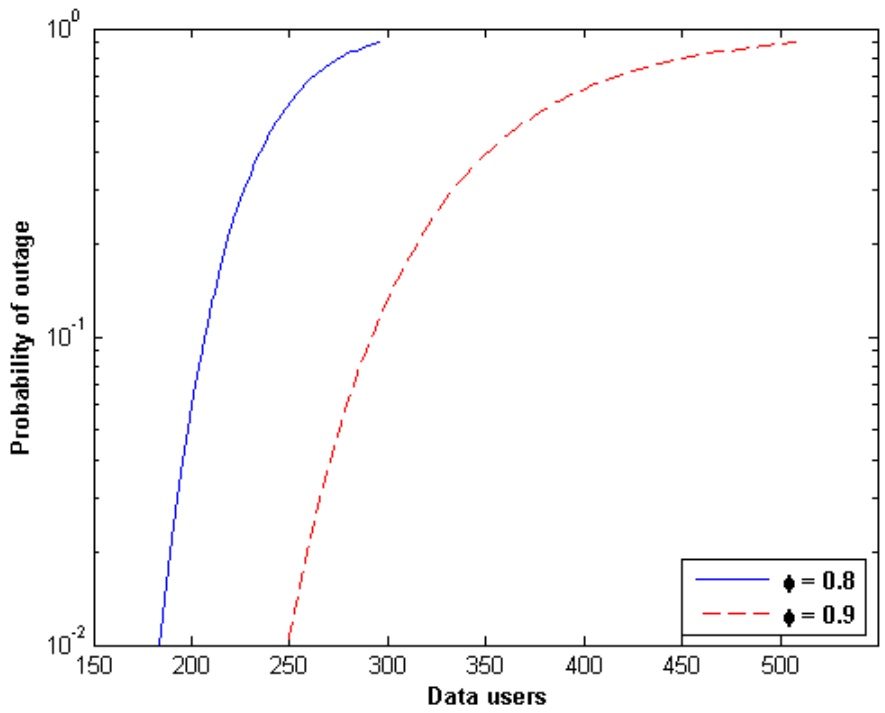


Figura 6.7 – Escenario C: Capacidad del servicio de datos – $C_{dm} = 0.5$

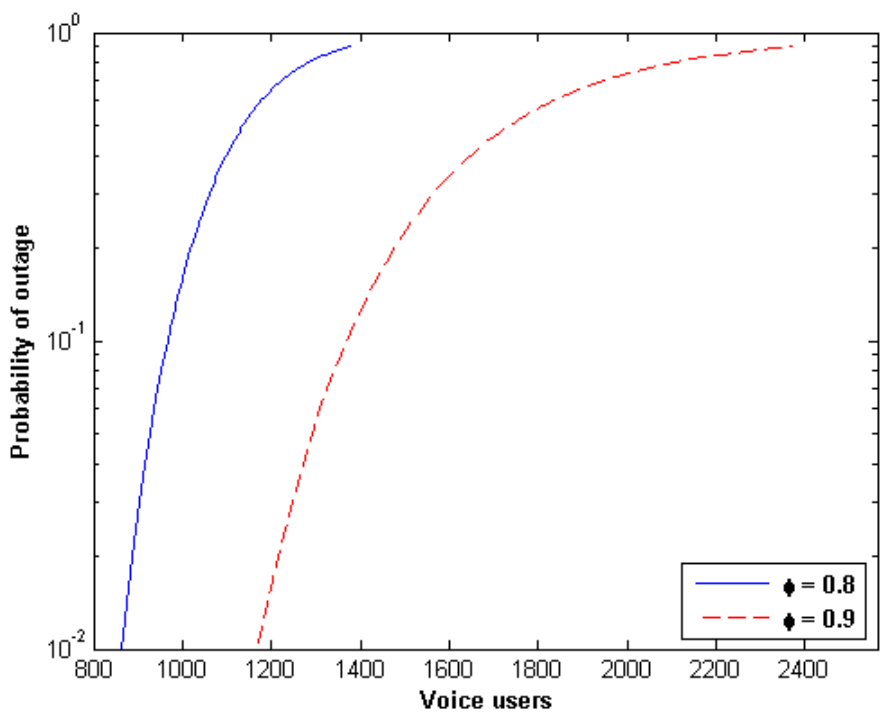


Figura 6.8 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz – $C_{dm} = 0.5$

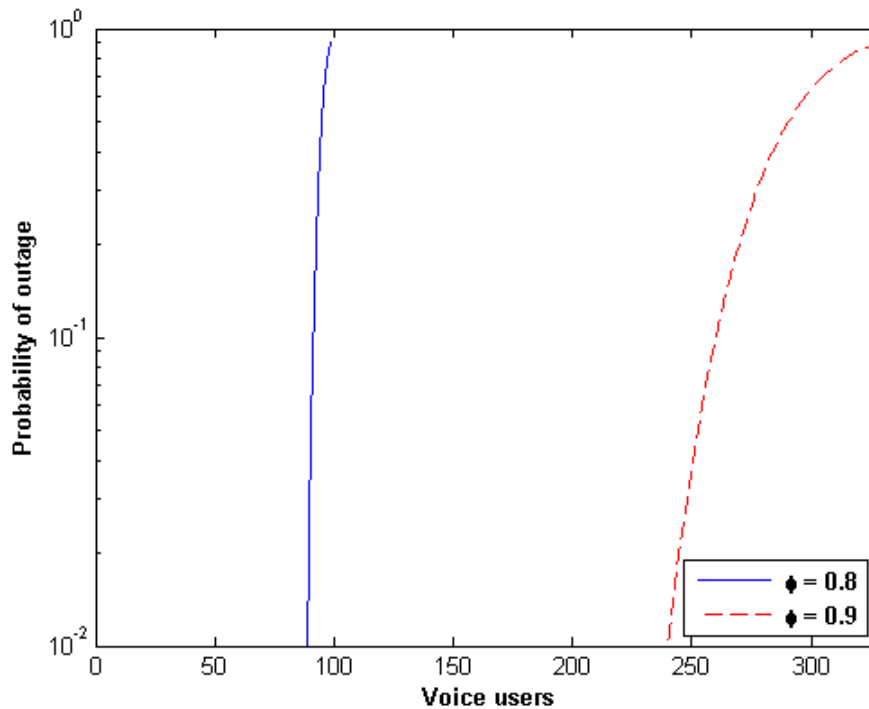


Figura 6.9 – Escenario C: Capacidad del servicio de voz – $N_{\text{datos}} = 16$ – $C_{dm} = 0.5$

La Tabla 6.3 y la Tabla 6.4 recogen los resultados para las capacidades de ambos servicios (voz y datos) para edificios de ladrillo y de cristal considerando para estos últimos una separación de 15m.

Tabla 6.3 – Escenario C: Capacidad downlink para el servicio de voz en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación

φ	N_{voz}			
	$L_{\text{fachada}} = 12\text{dB}$		$L_{\text{fachada}} = 6\text{dB}$	
	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$
0.8	657.42→256	861.84→256	605.74→256	792.02→256
0.9	821.72→256	1168.00→256	742.54→256	1043.40→256

Tabla 6.4 – Escenario C: Capacidad downlink para el servicio de datos en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación

φ	N_{datos}			
	$L_{\text{fachada}} = 12\text{dB}$		$L_{\text{fachada}} = 6\text{dB}$	
	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$
0.8	139.99→32	183.94→32	128.91→32	168.91→32
0.9	174.50→32	248.51→32	157.62→32	221.84→32

Tabla 6.5 – Escenario D: Capacidad del servicio conjunto voz + datos en función del factor de ortogonalidad y coeficiente de correlación.

φ	$N_{\text{voz}} + 16 \text{ datos}$			
	$L_{\text{fachada}} = 12\text{dB}$		$L_{\text{fachada}} = 6\text{dB}$	
	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$	$C_{dm} = 0$	$C_{dm} = 0.5$
0.8	74.67	88.71	70.14	83.65
0.9	158.94	239.71	139.74	206.06

En el peor escenario planteado ($C_{dm} = 0$) la bajada que se produce en la capacidad de ambos servicios es de un 58% para un factor de ortogonalidad de 0.8 y del 73% para 0.9, es decir una subida en torno al 1% respecto al escenario B. Sin embargo, si estudiamos este mismo escenario pero considerando edificios de cristal las bajadas son algo mayores situándose en el 61% y 75% para los dos valores de factor de ortogonalidad estudiados.

En este caso no hay una interferencia tan elevada como en el escenario B debido a las fachadas de los edificios que hacen que las señales procedente de otros edificios lleguen al usuario FUE con un nivel más débil y por tanto su efecto sobre la capacidad sea menor.

6.3 Escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal.

Descripción y objetivos

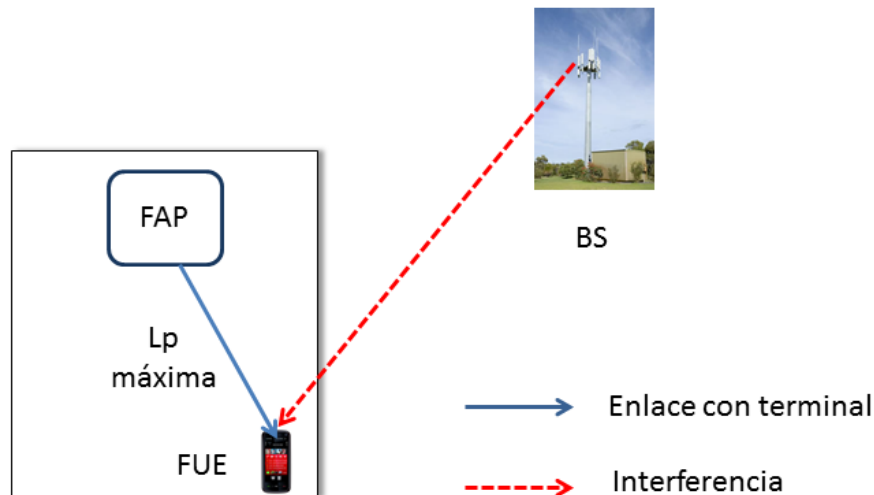


Figura 6.10 – Análisis de la interferencia macrocelda en el enlace descendente

En este escenario vamos a estudiar cómo interfiere el enlace descendente de una estación base macrocelda (BS) en un equipo usuario femtocelda (FUE) que se encuentra en el límite de cobertura ofrecido por su punto de acceso (FAP). Por tanto, en este caso además de la interferencia de las femtoceldas instaladas en el mismo edificio que se analizó en apartados anteriores, tendremos que añadir esta nueva fuente de interferencia.

Para el enlace entre estación base y equipo usuario haremos uso del modelo de propagación para exteriores explicado en el apartado 4.2 del capítulo 4, además, será necesario añadir las pérdidas por penetración. En la Tabla 6.6 se resumen los parámetros utilizados para el cálculo del balance de enlace entre estación base macrocelda y usuario femtocelda.

Tabla 6.6 – Parámetros para el balance de enlace entre BS y terminal FUE

Parámetro		Valor	Unidades	Comentarios
f		2100	MHz	Enlace descendente
Potencia transmitida BS		43	dBm	P_{tx_BS}
		20	W	
Potencia transmitida FAP		30	dBm	P_{tx_FUE}
		1	W	
Ganancia BS		17	dBi	G_{BS}
Ganancia FAP		0	dBi	G_{FAP}
Distancia entre BS y edificio		[100:1000]	m	d
Altura macrocelda		30	m	h_t
Altura antena de usuario		[7.5:25.5]	m	h_r
Desviación típica del desvanecimiento por sombra (macrocelda)		8	dB	σ_{sh}
Pérdidas por fachada	Ladrillo	12	dB	$L_{fachada}$
	Cristal	6		

Empezamos el estudio de la capacidad downlink para el caso general en el que se puede aplicar el modelo modificado de Hata-COST231, representando un edificio aislado con otros edificios en los alrededores separados por zonas verdes y/o calles. Partimos de una situación en la que la estación base se encuentra a 100m de nuestro edificio ya que para distancias menores se ha visto que el comportamiento de los sistemas femtocelda en presencia de macroceldas tan cercanas se ve fuertemente afectado por la interferencia de esta, obteniendo unos resultados muy desfavorables. Por este motivo, no será aconsejable el despliegue de femtoceldas en escenarios con presencia de alguna estación base macrocelda a menos de 50m.

Por otro lado, para conseguir un comportamiento mejor se ha realizado el análisis para una potencia de transmisión de femtocelda de 1W. También se ha estudiado el efecto que tiene la interferencia macrocelda según la altura a la que se encuentre el usuario ya que cuanto más alta sea la planta en la que se encuentre, más alta será la interferencia procedente de la estación base.

Para realizar estos últimos cálculos, se ha hecho una interpolación del modelo Hata-COST 231 para calcular las pérdidas de propagación para alturas de antena de usuario superiores a 10m, altura máxima que soporta el modelo anterior. A partir de alturas superiores a 30 m se considera propagación en el espacio libre. La Figura 6.11 muestra las pérdidas obtenidas con esta aproximación para una distancia entre estación base y edificio de 100m.

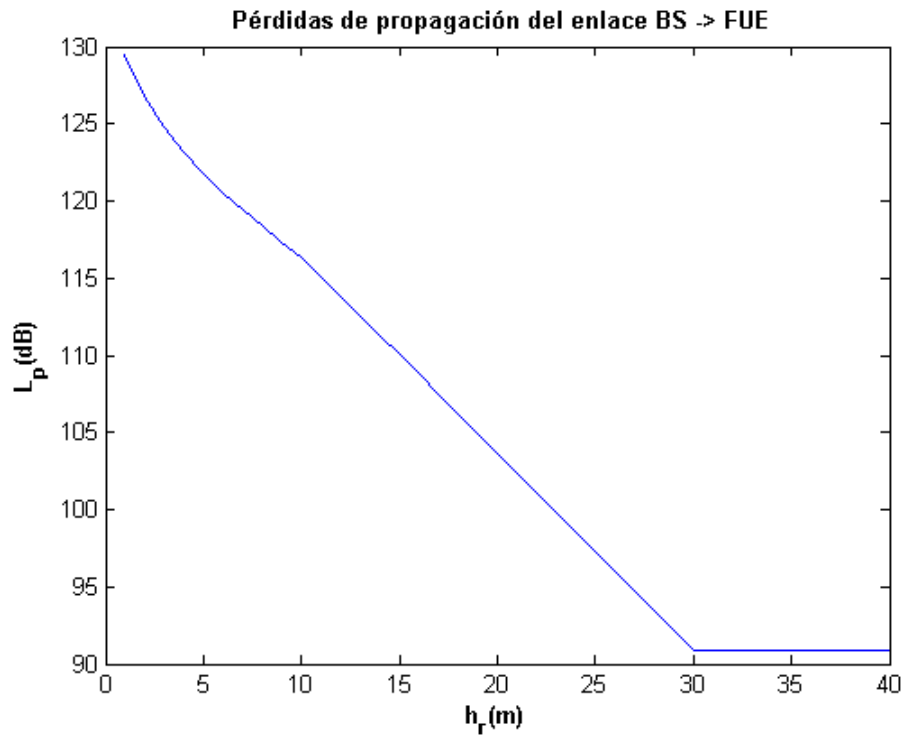


Figura 6.11 – Valor medio de las pérdidas de propagación del enlace BS → FUE – Distancia entre BS y edificio = 100m

Resultados y conclusiones

La Figura 6.12 y la Figura 6.13 muestran la capacidad obtenida en este escenario para los servicios de datos y voz respectivamente en función de la distancia entre estación base y edificio para varias alturas de antena de usuario. Los resultados mostrados son para una probabilidad de bloqueo del 1%, un factor de ortogonalidad de 0.9 y un coeficiente de correlación de 0.5.

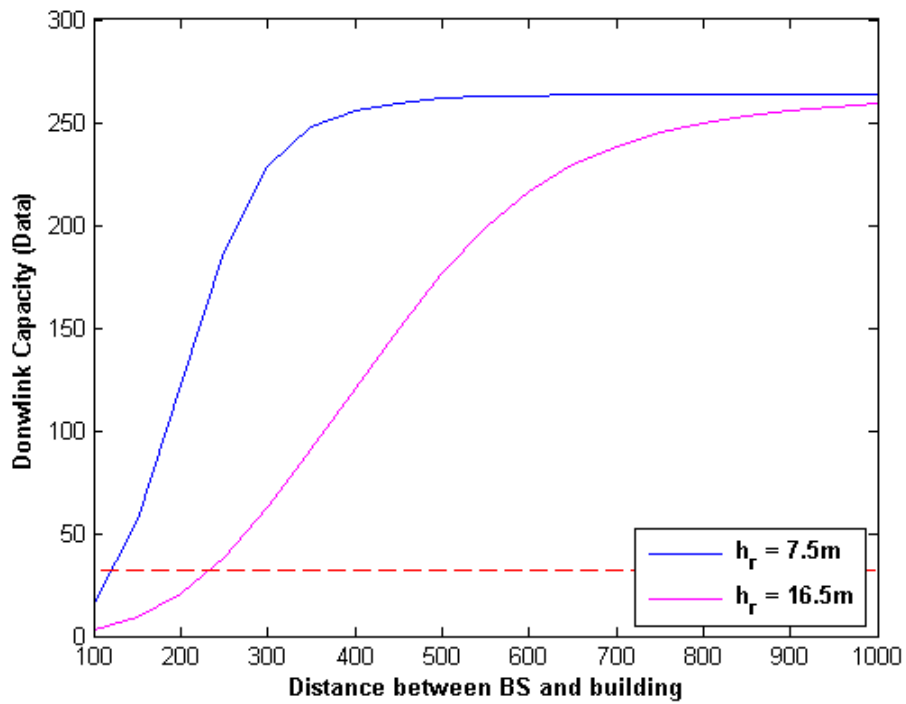


Figura 6.12 – Escenario B: Capacidad downlink del servicio de datos – Altura de antena de usuario

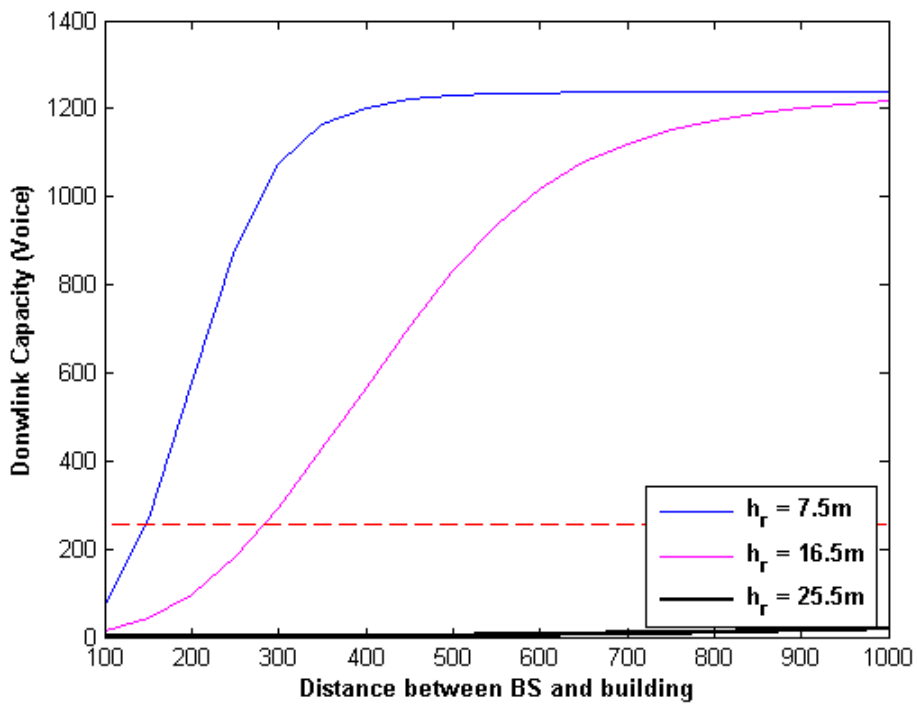


Figura 6.13 – Escenario B: Capacidad downlink del servicio de voz – Altura de antena de usuario

Si analizamos en primer lugar el efecto de la altura de la antena de usuario, vemos que se cumple que a mayor altura menor capacidad. Esto se debe, si se observa la Figura 6.11, a que cuanto mayor sea la planta donde se encuentre el usuario dentro del edificio, menores serán las pérdidas y por tanto el nivel de señal interferente será mayor. Así, para el servicio de voz se podría prestar servicio con la femtocelda inferior y central del edificio estudiado. Sin embargo, en cuanto a la femtocelda superior, que se corresponde con el caso estudiado para una altura de antena de usuario superior o igual a 25.5 m, su comportamiento se verá fuertemente afectado por la interferencia macrocelda incluso para estaciones base bastante alejadas del edificio por lo que no sería aconsejable su instalación. Para el servicio de voz ocurre lo mismo y en ninguno de los dos casos se contemplaría la posibilidad de instalar la femtocelda superior.

Si nos centramos ahora en la capacidad de la femtocelda inferior que es la que podría prestar un servicio aceptable, en ambos servicios se puede ver como a partir de una distancia de 450 m se empieza a saturar el valor teórico obtenido para la capacidad en ambos servicios. Sin embargo, hay que tener siempre en cuenta que estos valores son mayores que el número máximo de códigos disponibles en la práctica. Este comportamiento se debe a que a partir de ese punto las pérdidas que sufre la señal macrocelda interferente son muy elevadas y por tanto su interferencia es casi nula.

A pesar de los resultados tan negativos que se han obtenidos, en ninguno de los dos servicios el enlace descendente sería el que limitara la capacidad de la femtocelda inferior ya que los valores obtenidos son superiores a los del enlace ascendente.

Se puede bajar gradualmente la potencia de transmisión de la femtocelda a partir de la distancia en que la capacidad downlink es un 5% superior a la capacidad uplink, hasta llegar a una potencia de 200 mW.

A continuación vamos a estudiar dos casos más con interferencia macrocelda. En primer lugar se ha calculado la capacidad downlink para un edificio situado enfrente de la estación base y sin obstáculos (edificios) entre ellos. En este caso se ha utilizado para el cálculo de las pérdidas por propagación el modelo de propagación en el espacio libre. En este caso se ha notado que la capacidad es nula independientemente de la ubicación del usuario peor bajo estudio.

En segundo lugar, se añade al escenario anterior un edificio delante del de estudio y sin separación entre ellos. La Figura 6.14 y la Figura 6.15 muestran los resultados de la capacidad para ambos servicios para tres valores distintos de pérdidas por penetración del edificio anterior. Se observa que la capacidad downlink aumenta con el aumento de las pérdidas extra. Se nota también que el efecto de la interferencia de la macrocelda sobre el servicio de datos es inferior debido a que la capacidad en este caso es menor que en voz dando lugar a mayor potencia asignada al usuario bajo estudio.

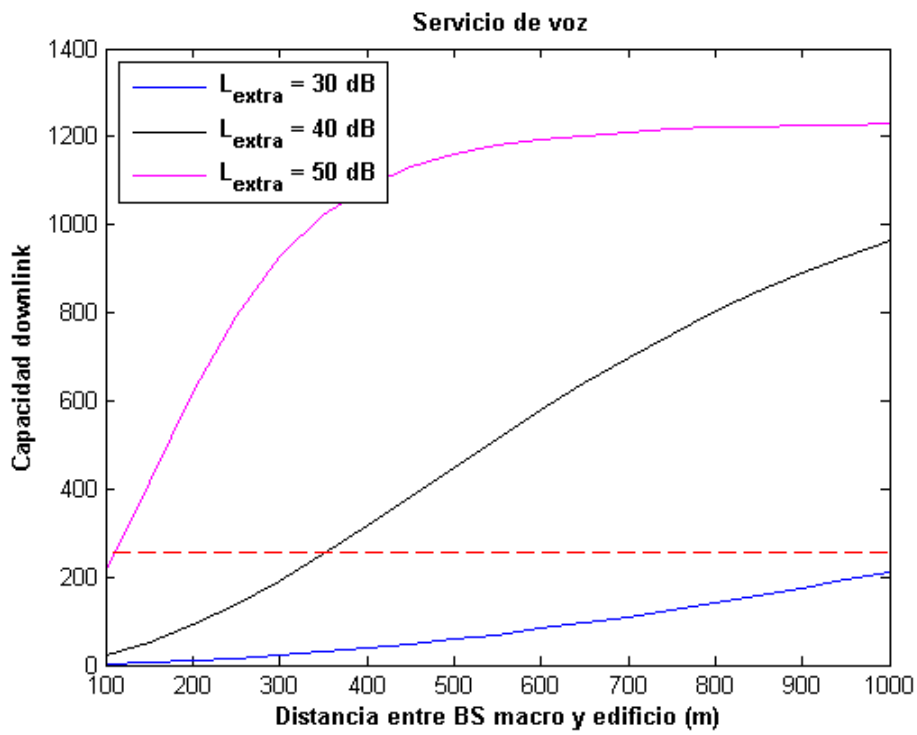


Figura 6.14 – Capacidad del servicio de voz para 3 valores de L_{extra}

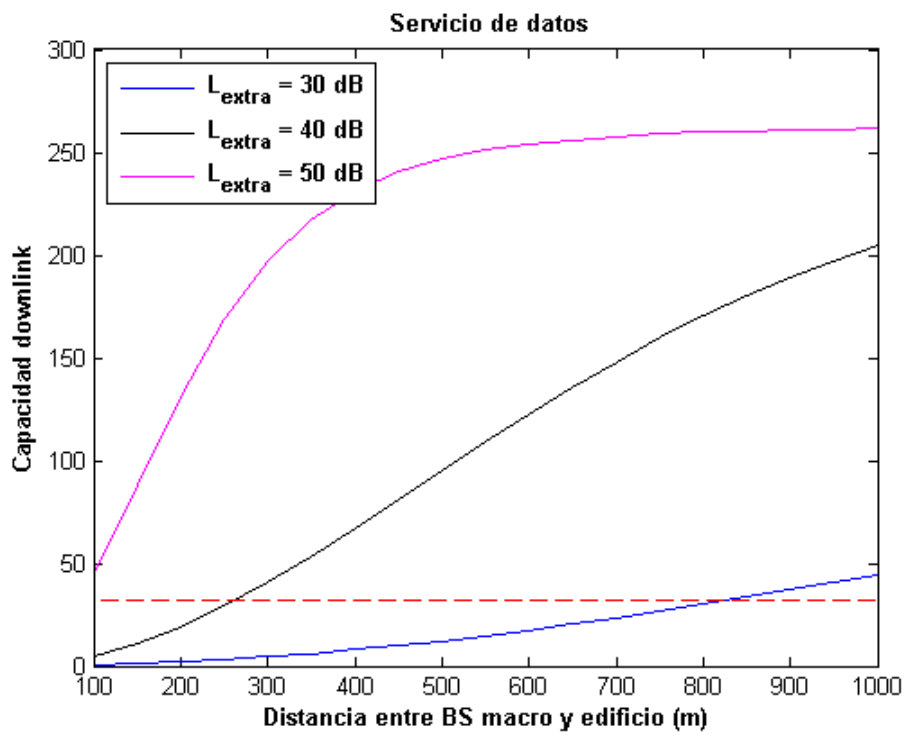


Figura 6.15 – Capacidad del servicio de datos para 3 valores de L_{extra}

CAPÍTULO 7

7 Conclusiones y Trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Tras realizar un análisis en profundidad de distintos escenarios y situaciones en las que se pueden desplegar sistemas femtocelda estamos en posesión de aportar las conclusiones derivadas de este proyecto.

Las conclusiones obtenidas se refieren a los dos objetivos principales que perseguía este proyecto y que se recogen en el capítulo 1:

- Cálculo analítico de la capacidad uplink y downlink de femtoceldas que hagan uso de un canal dedicado, es decir, que no compartan la misma banda de frecuencias que las macroceldas.
- Cálculo analítico de la capacidad uplink y downlink de femtoceldas que compartan la misma banda de frecuencias que la red macrocelda cercana.

7.1.1 Conclusiones sobre los escenarios con femtoceldas de canal dedicado

Para este apartado en concreto se ha estudiado la capacidad uplink y downlink para femtoceldas aisladas y para despliegues de múltiples femtoceldas compartiendo la misma frecuencia.

Si nos centramos en el estudio de la capacidad uplink de femtoceldas que se encuentran en una vivienda donde sólo hay un dispositivo de este tipo instalado, se ha visto que su capacidad estará limitada por interferencia intracelular en el caso de servir a los usuarios de tres plantas y por interferencia más ruido si se instala para servir a cinco plantas ya que el área de cobertura será mayor y tendremos más obstáculos entre usuarios y el punto de acceso.

Por otro lado, si pasamos a analizar la convivencia de femtoceldas en un mismo edificio, y partimos de un despliegue con 3 femtoceldas sirviendo cada una a tres plantas, la reducción en la capacidad en relación a la que obteníamos con una sola femtocelda es del 2% tanto para el servicio de voz como para datos. Ahora, si además se plantea un escenario en el que este edificio se encuentre entre dos edificios con idénticas características y con 3 FAP instalados en su interior, la capacidad inicial no se verá casi afectada por los usuarios de las 6 femtoceldas interferentes. Esto se debe, como ya se ha comentado anteriormente, a que las señales procedentes de otros edificios llegan con un nivel muy bajo al atravesar paredes y fachadas.

El último estudio sobre el comportamiento de femtoceldas sin interferencia macrocelda, se ha hecho para un escenario en el que el uso de sistemas femtoceldas se haga en edificios acristalados. Este escenario es más crítico que los anteriores debido a sus características que hacen que la interferencia procedente de usuarios de otros edificios sea mayor. Mientras que en los escenarios con edificios residenciales la interferencia era casi nula en este caso la capacidad uplink se puede reducir hasta en un 3.5% que aunque no es muy elevada puede llegar a impedir la conexión de un usuario de voz. Para un escenario más extremo en el que gran parte de los

edificios de oficinas cercanos al nuestro también hagan uso de sistemas femtocelda, como puede ser el caso planteado en el escenario F, los servicios prestados pueden verse bastante afectados en estas condiciones con bajadas cercanas al 14%.

Si pasamos ahora a analizar la capacidad downlink de nuestro sistema femtocelda, los resultados son muy distintos. La interferencia intracelular e intercelular no llega a ser tan elevada como para tener una capacidad limitada por interferencia. Por eso el factor limitante será el número máximo de códigos que se puede asignar a cada servicio (32 para datos y 256 para voz).

Tras todo este análisis podemos concluir que la capacidad de las femtoceldas estará limitada por el enlace ascendente. Por otro lado, hay que tener en cuenta que las situaciones propuestas se corresponden con los casos más desfavorables para nuestra femtocelda y por tanto, se espera que en una situación real el comportamiento sea algo mejor.

7.1.2 Conclusiones sobre los escenarios con femtoceldas y macroceldas co-canal

Para escenarios en los que se ha estudiado la interacción entre las capas macro y femto celda se puede concluir lo siguiente:

Partiendo de que todos nuestros estudios parten de un caso extremo en la práctica, esto es, usuarios a 10 m de nuestro edificio y transmitiendo en su enlace ascendente con la máxima potencia disponible, los resultados no han sido muy negativos.

En cuanto a la capacidad del servicio de datos, ésta se verá reducida, en presencia de 4 usuarios de datos MUE sin permiso de conexión con nuestra femtocelda en sólo un 3,5%, mientras que si nos vamos al peor de los casos en el que el número de usuarios MUE realizando una llamada de voz es de 36, la reducción se sitúa en un 12.5%. En este último supuesto, la influencia de la interferencia macro en nuestra femtocelda empieza a ser significativa aunque la situación es poco probable en la práctica. Para el servicio de voz las bajadas son algo menores pero se encuentran también en torno a esos niveles de interferencia.

Sin embargo, en entornos con oficinas la situación empeora considerablemente ya que el nivel de interferencia es mayor debido a las fachadas de cristal que no mitigan tanto la señal entrante. En este caso se pueden dar bajadas de hasta el 50% con 36 usuarios MUE en los alrededores de la oficina. Debemos recalcar en este punto que la probabilidad de que haya una mayor concentración de usuarios de voz en los alrededores de una oficina es mayor que en un entorno residencial.

También se ha podido ver, con los estudios realizados que la interferencia de usuarios a 45 m o más es casi nula, por lo que la mayor parte de la interferencia provendrá de usuarios cercanos al edificio.

En el estudio de la interferencia macrocelda en el enlace descendente hay que distinguir 3 escenarios de estudio. En el escenario general, el edificio bajo estudio se encuentra rodeado por otros edificios entre los que puede haber calles y zonas verdes. Se ha visto que para ubicaciones

del usuario peor dentro del edificio mayores o iguales a 25.5 m la capacidad es nula en el caso del servicio datos y casi nula para el servicio de voz sea cual sea la distancia entre edificio y estación base macrocelda. A unas alturas menores, se consigue mayor capacidad con el aumento de la distancia entre estación base y edificio y con la bajada de la altura del punto en que se encuentre el usuario peor bajo estudio. Para el caso especial en el que el edificio se encuentra enfrente de la estación base y sin obstáculos (edificios) entre ellos se ha notado que la capacidad es nula independientemente de la ubicación (distancia y altura) del usuario bajo estudio por tener unas pérdidas entre macrocelda y usuario muy bajas en comparación con las pérdidas interiores que sufre la señal del usuario peor. Por último, se ha añadido al escenario anterior un edificio delante del de estudio y sin separación entre ellos. En esta situación se ha observado que la capacidad downlink aumenta con el aumento de las pérdidas por penetración del edificio (pérdidas extra). También se ha notado que el efecto de la interferencia de la macrocelda sobre el servicio de datos es inferior que en voz.

7.2 Trabajo futuro

Un posible trabajo futuro sobre este proyecto sería estudiar la capacidad de los sistemas femtocelda pero en este caso para servicios de datos de alta velocidad HSPA (High Speed Packet Access) que introduciendo un nuevo canal compartido en el downlink, mejora la tasa binaria de descarga hasta los 14.4 Mbps y hasta 5.76 Mbps en uplink. Por tanto, se espera que la experiencia de usuario mejore aún más en interiores con el uso de femtoceldas.

Por otro lado, también se podría estudiar la interferencia en el sentido contrario, es decir, el efecto de las femtoceldas sobre las macroceldas. El estudio se centraría en determinar la interferencia que podrían provocar los dispositivos femtocelda en usuarios macrocelda. Las femtoceldas pueden llegar a crear las denominadas “zonas muertas” por el 3GPP, en las que los usuarios macrocelda no pueden hacer uso de los servicios prestados por su estación base aunque estén en una zona con buena cobertura macrocelda debido a su cercanía con el punto de acceso femtocelda. Sin embargo, ya se han realizado multitud de estudios para este último caso y se ha visto que esa situación no es tan crítica como en el caso contrario y con técnicas como el control de potencia se pueden reducir los radios de estas “zonas muertas”.

Por último, se podrían rehacer los cálculos para la capacidad utilizando una antena con un diagrama de radiación práctico. Es decir, considerar que la antena femtocelda tiene una ganancia distinta de cero, por lo que el comportamiento de la femtocelda sería algo mejor que en el caso ya estudiado.

8 Referencias

- [1] H. Claussen, "Performance of Macro-and-Co-Channel Femtocells in a Hierarchical Cell Structure," in *Proc.IEEE 18th Internat. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC '07)*, Athens,Greece, 2007.
- [2] H. Claussen, L. G. Samuel and L. T. Ho, "An Overview of Femtocell Concept," *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 221-245, 2008.
- [3] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Femtocell Networks: A survey," *The University of Texas of Austin Alan Gatherer*, Junio 2008.
- [4] Q. Kalahoro, M. A. Kalhor, S. Abbasi and K. Khoumabti, "Analysis of femtocells Deployment with Different Air-Interfaces," in *12th International Conference on Computer Modeling Simulation*, 2010.
- [5] A. Goloup, M. Mustapha and L. Boonchin, "Femtocell Wireless Communications. Femtocell Acces Control Strategy in UMTS and LTE," *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009.
- [6] 3GPP TS 22.220, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Service Requirements for Home NodeBs ans Home eNodeBs," Septiembre, 2009.
- [7] F. Duran and G. G. Carrasco, "UMTS Femtocell Performance in Massive Deployments Capacity and GoS Implications," *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 185-202, 2009.
- [8] Femto Forum, "Interference Management in UMTS Femtocells," December 2008.
- [9] Z. Shi, M. Zhao, M. C. Reed y H. Wang, «On the Uplink Coverage and Capacity of UMTS Femtocells in Enterprise Environment,» [En línea]. Available: .nicta.com.au/pub?doc=4110.
- [10] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghothaman and A. Richardson, "Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA + Femtocells," *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-109, September 2009.
- [11] Z. Shi, M. C. Reed, M. Zhao y H. Wang, «Uplink Interference Scenarios in Two-Tier Networks,» de *Conference record on the 40th Asilomar Coonference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2010.
- [12] V. Chadrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen y A. Gatherer, «Power control in two-tier femtocell netwroks,» *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 8, Agosto 2009.

- [13] 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.
- [14] B. T. Ahmed y M. C. Ramón, «WCDMA Multiservice Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 1-8, 2007.
- [15] B. Taha, "Bit Rate of HSDPA in Tunnel's Cigar-Shaped Microcells".
- [16] L. Town and J. P. Combe, "Coverage prepositions for Orange Customers," in *FemtoZone Mobile Congress*, Barcelona, 2009.
- [17] J. L. Randolph, «Femtocell Economics,» de *GSMA Mobile World Conference*, Barcelona, 2009.
- [18] Informa Telecoms & Media, «Mobile Broadband Access at Home,» 2009.
- [19] R. Baines, «Femtocells Broadenind Applications, Broadening standards. The need for Femtocells, from 3G to 4G.,» de *Femtozone Mobile World Congress*, Barcelona, 2009.
- [20] Ip.access, «Femtozone services in the conected Home,» de *Femtozone Mobile World Congress*, Barcelona, 2009.
- [21] J. M. Naworocki, M. Dohler and A. H. Aghvami, *Understanding UMTS radio network*, Second ed., Wiley, 2006.
- [22] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS-HSPA evolution and LTE*, Fourtg ed., Wiley, 2007.
- [23] J. M. Hernando y C. Lluch, *Comunicaciones Móviles de Tercera Generación.Sistemas UMTS*, Second ed., Telefónica Móviles España, 2000.
- [24] J. H. Rábanos, *Transmisión por radio*, 6º ed., Ed. Centro de estudios Ramón Areces. S.A, 2008.
- [25] C. Jhonson, *Radio Access Networks for UMTS: Principles and Practice*, John Wiley, 2008.
- [26] H. Holma y A. Toskala, *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*, John Wiley & Sons, 2002.

9 *Glosario*

2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANSI	American National Standards Institute
AP	Access Point
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Control Network
CRC	Códigos de Redundancia Cíclica
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAP	Femtocell AP
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FUE	Femtocell UE
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HLR	Home Location Register

HNB	Home Node B
IMT	International Mobile Telecommunication
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
MSC/VLR	Mobile Services Switching Centre /Visitor Location Register
MUE	Macrocell UE
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
P_CPICH	Primary Common Pilot Channel
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RNC	Radio Network Control
RNS	Radio Network System
SC	Scrambling Code
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
TIA	Telecommunications Industries Association
UE	User Equipment
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WARC	World Administrative Radio Conference
W-CDMA	Wide-Code Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Anexos

Anexo A: Código Matlab

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%  Marta Anaya de Paz
%%
%%                               * Femtoceldas de UMTS *
%%
%%
%%  Cálculo de la capacidad uplink femtocelda para los distintos
%%  servicios
%%
%%  ESCENARIO: Interferencia intra
%%              + interferencia inter-femtoceldas en el mismo edificio
%%              + interferencia inter edificios laterales
%%              + interferencia inter edificios posteriores
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
clc
close all
clear all

close all
clear all
clc

tic

%% Datos
f = 1.92*10^9;           % Frecuencia enlace ascendente (Hz)
c = 3*10^8;             % Velocidad de la luz (m/s)
lambda = c/f;           % Longitud de onda (m)

cd0=0.5;                % Coeficiente de correlación inter-
femtocelda, valores [0 0.5]
sigma_sh = 3;           % Desviación estandar de desvanecimiento por
sombra en interiores
sigma = sqrt(2*(1-cd0).*sigma_sh^2); % Desviación típica efectiva
sigmac=[0.5 1];        % Desviación estandar de control de potencia
Lfachada =12;

G1 = 0;                 % Ganancia equipo usuario femtoceldas
G2 = 0;                 % Ganancia punto de acceso femtocelda
```

II | Anexos

```
Pn = 10^(-10); % Potencia de ruido en el receptor femtocelda
betha = 0.23; % Constante para cálculos de estadísticos de
interferencia

% %%% Datos para voz
% Gp = 256; % Ganancia de procesado
% Eb_N0_target= 7; % dB
% eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
% alpha = 0.66 % Factor de ocupación
% Ptx = 17.5; % dBm

% %%% Datos para voz
Gp = 32; % Ganancia de procesado
Eb_N0_target= 3; % dB
eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
alpha = 1 % Factor de ocupación
Ptx = 23; % dBm

% Datos modelo de propagación interior
h_usuario = 1.5; % m
b=0.46; % constante para cálculo pérdidas por
planta
L_planta = 18.3; % Pérdidas por planta (dB)
L_pared = 6.9; % Pérdidas por pared (dB)
dref =1; % Distancia de referencia (m)
num_planta = 3; % Plantas físicas servidas por
femtocelda
num_plantas = (num_planta-1)/2; % Número máximo de plantas atravesadas
por un usuario

% Cálculo pérdidas de propagación del modelo multi-pared

% Pérdidas a una distancia de referencia (dref = 1m)
Lref = 20*log10(4*pi*dref/lambda);
% Pérdida máxima de un usuario femtocelda: usuario más alejado
Lpmax =Lref + 20*log10(sqrt((6+3.*3).^2+(6-
h_usuario).^2))+L_pared.*3+(num_plantas.^(-
b+(num_plantas+2)./(num_plantas+1))).*L_planta;

%% LLamada a la función que calcula el factor de relación de
%% interferencia intercelular provocada por las femtoceldas del propio
%% edificio
%%
[L a_celula_sup a_celula_inf] = factorf_edificio_propio
L1 = a_celula_sup;
L2 = a_celula_inf;

%% LLamada a la función que calcula el factor de relación de
interferencia de los edificios
%% laterales
%%
[a_edificio_adyacente] = factorf_edificio_adyacente(Lfachada);
```

```

L3 = a_edificio_adyacente;

%% Llamada a la función que calcula el factor de relación de
%% interferencia de los edificios posteriores
%%

[a1 a2 a3] = factorf_edificio_posterior_paredes(Lfachada);
L41 = a1;      % Factor f en planta central
L42 = a2;      % factor f en planta superior
L43 = a3;      % Factor f usuarios edificios laterales (planta central)

%% Cálculo potencia recibidas en la femtocelda del usuario más alejado
para los servicios de voz y datos
Prx = 10^((Ptx + G1 + G2 - Lpmax -2.33*sigma_sh)/10);

%% - - - - -
%% Cálculo esperanza intracelular
k = exp(betha^2.*sigmac.^2./2);
E_intra = k.*alpha;

%% ----- CÁLCULO DE LA ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR

%% Femtocelda superior de nuestro edificio
X1 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L1);
Q_E1 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X1)
f1 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E1;
E_inter1 = k.*alpha.*sum(sum(L1.*f1))./21;

%% Femtoelda inferior de nuestro edificio
X2 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L2);
Q_E2 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X2)
f2 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E2;
E_inter2 = k.*alpha.*sum(sum(L2.*f2))./21;

%% 3 Femtoceldas edificio lateral
X3= (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L3);
Q_E3 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X3);
f3 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E3;
E_inter3 = (18/63).*(k.*alpha.*sum(sum(L3.*f3)));

%% Femtocelda central del edificio posterior
X41 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L41);
Q_E41 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X41);
f41 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E41;
E_inter41 = (k.*alpha.*sum(sum(L41.*f41)))./(14);

X42 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L42);
Q_E42 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X42);
f42 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E42;
E_inter42 = (k.*alpha.*sum(sum(L42.*f42)))./(14);

%% Efecto usuarios de las 4 habitaciones más cercanas de los edificios
posteriores laterales

X43 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L43);
Q_E43 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X43);
f43 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E43;

```

IV | Anexos

```

E_inter43 = (4/14).*(k.*alpha.*sum(sum(L43.*f43)));

%% ----- CÁLCULO ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
E_intra = k.*alpha;

for j =1:length(sigmac)

p(j)= exp(2*betha^2*sigmac(j)^2);
q(j) = exp(betha^2*sigmac(j)^2);

%% ----- CÁLCULO DE LA VARIANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
Var_intra(j) = p(j).*alpha-q(j).*alpha.^2;

%% ----- CÁLCULO DE LA VARIANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR

%% Femtocelda superior de nuestro edificio
Q_Var1 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X1);
g1 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var1;

Var_inter1(j) = sum(sum(L1.^2.*(p(j).*alpha.*g1-
q(j).*alpha.^2.*f1.^2)))/21;

%% Femtocelda inferior de nuestro edificio
Q_Var2 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X2);
g2 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var2;

Var_inter2(j) = sum(sum(L2.^2.*(p(j).*alpha.*g2-
q(j).*alpha.^2.*f2.^2)))/21;

%% 3 Femtoceldas del edificio lateral
Q_Var3 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X3);
g3 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var3;

Var_inter3(j) = (18/63).*(sum(sum(L3.^2.*(p(j).*alpha.*g3-
q(j).*alpha.^2.*f3.^2))));

%% Femtocelda central del edificio posterior
Q_Var41 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X41);
g41 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var41;

Var_inter41(j) = (sum(sum(L41.^2.*(p(j).*alpha.*g41-
q(j).*alpha.^2.*f41.^2)))/14;

Q_Var42 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X42);
g42 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var42;

Var_inter42(j) = (sum(sum(L42.^2.*(p(j).*alpha.*g42-
q(j).*alpha.^2.*f42.^2)))/14);

```



```

%% Efecto usuarios de las 4 habitaciones más cercanas de los edificios
%% posteriores laterales (4/14)

Q_Var43 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X43);
g43 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var43;

Var_inter43(j) = (4/14).*(sum(sum(L43.^2.*(p(j).*alpha.*g43-
q(j).*alpha.^2.*f43.^2)))));

%% CÁLCULO ESPERANZA Y VARIANZA DE POTENCIA DE INTERFERENCIA TOTAL
%% En el caso de edificios adyacentes (E_inter3 y Var_inter3)
%% multiplicamos por dos para tener en cuenta el efecto de los dos
%% edificios laterales
%% Para el caso de los edificios posteriores, multiplicamos por dos el
%% efecto del edificio posterior lateral para tener en cuenta los dos
que
%% hay.

E_total = E_intra + E_inter1 + E_inter2 + 2.*E_inter3 +
E_inter41+2.*E_inter42+2.*E_inter43;
Var_total = Var_intra + Var_inter1 + Var_inter2 + 2.*Var_inter3 +
Var_inter41+2.*Var_inter42+ 2.*Var_inter43;

%% ----- CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS EN
%% FUNCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE DESBORDAMIENTO
outage = 0.01:0.01:0.9;

for i = 1:length(outage)

    A(i) = qfuncinv(outage(i));

    for N = 1:0.01:1000
        Eb_N0 = (Prx./(N.*Prx*E_total(j) + Pn +
A(i)*Prx.*sqrt(Var_total(j).*N)).*Gp;

        if (Eb_N0 < eb)
            break;
        end

    end
    C(j,i) = N-0.01;
end
end

%% Representación de los datos

semilogy(C(1,:),outage)
hold on
semilogy(C(2,:),outage,['r','--']);

axis([12 C(1,end) 0.01 1])
ylabel('\bf Probability of outage');
xlabel('\bf Voice users');
xlabel('\bf Data users');
legend('\bf \sigma_c = 0.5 dB', '\bf \sigma_c = 1.0 dB',2);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%      Marta Anaya de Paz
%%
%%
%%                                * Femtoceldas de UMTS *
%%
%%
%%      Cálculo de la capacidad uplink femtocelda para los distinto
servicios %%
%%      ESCENARIO: Interferencia intra
%%
%%      + interferencia inter-femtoceldas del mismo edificio
%%
%%      + interferencia macrocelda
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
close all
clear all

%% Datos
f = 1.92*10^9;           % Frecuencia enlace ascendente (Hz)
c = 3*10^8;             % Velocidad de la luz (m/s)
lambda = c/f;          % Longitud de onda (m)

cd0=0.5;                % Coeficiente de correlación
inter-femtocelda, valores [0 0.5]
sigma_sh = 3;           % Desviación estandar de
desvanecimiento por sombra en interiores
sigma_femto = sqrt(2*(1-cd0).*sigma_sh^2); % Desviación estandar
efectiva
sigma_sh_interior = 3; % Desviación típica de
desvanecimiento por sombra en interiores
sigma_sh_exterior = 4; % Desviación típica de
desvanecimiento por sombra en exteriores
%% Valor efectivo de sigma para el enlace entre el usuario macrocELDA y
la
%% femtocelda
sigma_macro = sqrt((sigma_sh_interior-sigma_sh_exterior)^2+ 2*(1-
cd0).*sigma_sh_interior*sigma_sh_exterior);

sigmac = [0.5 1]; % Desviación típica de control de potencia
betha = 0.23; % Constante para cálculos de estadísticos de
interferencia
G1=0;
G2=0;

%% Datos usuarios de voz femtocelda
% alpha = 0.66; % Factor de ocupación para servicios de voz
% Gp = 256; % Ganancia de procesamiento

```

```

% Eb_N0_target= 7;           % dB
% eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
% Ptx = 17.5;                % Potencia de transmision de voz (dBm)
% Pn = 10^(-10);            % Potencia de ruido en el equipo usuario
femtocelda

% Datos usuarios de datos femtocelda
alpha = 1;                   % Factor de ocupación para servicios de datos
Gp = 32;                      % Ganancia de procesado
Eb_N0_target= 3;             % dB
eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
Ptx = 23;                     % Potencia de transmisión de datos (dBm)
Pn = 10^(-10);               % Potencia de ruido en el receptor femtocelda

%% Datos para interferencia macro
num_usuarios_macro =4;
Ptx_max_macro = 23;          %% 19 dBm para voz y 23 dBm para datos
Ptx_max_femto = 23;          %% 17.5 dBm para voz y 23 dBm para datos
L_fachada = 6;
d_u_to_edificio = 10;

% Datos modelo de propagación interior
h_usuario = 1.5;              % m
b=0.46;                       % constante para cálculo pérdidas por
planta
L_planta = 18.3;              % Pérdidas por planta (dB)
L_pared = 6.9;                % Pérdidas por pared (dB)
dref =1;                       % Distancia de referencia (m)
num_planta = 3;                % Plantas físicas servidas por
femtocelda
num_plantas = (num_planta-1)/2; % Número máximo de plantas atravesadas
por un usuario

% Cálculo pérdidas de propagación del modelo multi-pared

% Pérdidas a una distancia de referencia (dref = 1m)
Lref = 20*log10(4*pi*dref/lambda);
% Pérdida máxima de un usuario femtocelda: usuario más alejado
Lpmax =Lref + 20*log10(sqrt((6+3.*3).^2+(3*(num_plantas+1)-
h_usuario).^2))+L_pared.*3+(num_plantas.^(-
b+(num_plantas+2)./(num_plantas+1))).*L_planta;

%% LLamada a la función que calcula el factor de relación de
%% interferencia intercelular provocada por las femtoceldas del propio
%% edificio
%%
[L a_celula_sup a_celula_inf] = factorf_edificio_propio
L1 = a_celula_sup;
L2 = a_celula_inf;

% LLamada a la función que calcula el factor de relación de
interferencia de los edificios
%% laterales
%%

[a_edificio_adyacente] = factorf_edificio_adyacente(L_fachada);
L3 = a_edificio_adyacente;

% LLamada a la función que calcula el factor f para la interferencia
macrocélula

```

```

[a500_n2 a135_n2 a500_n3 a135_n3]=
factorf_macrocela(Ptx_max_macro,Ptx_max_femto,L_fachada,d_u_to_edificio)
;
% Factor de relación de interferencia macrocela si el usuario MUE se
% encuentra en el borde de cobertura macrocela (R = 500m)
L4 = a500_n2;

%% Cálculo potencia recibida en unidades naturales
Prx = 10^((Ptx + G1 + G2 - Lpmax -2.33*sigma_sh)/10);

%% ----- CÁLCULO DE LA ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
k = exp(betha^2.*sigmac.^2./2);
E_intra = k.*alpha;

%% ----- CÁLCULO DE LA ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR

%% Femtocelda superior
num_usuarios = 21;
sigma = sigma_femto;

X1 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L1);
Q_E1 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X1);
f1 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E1;
E_inter1 = k.*alpha.*sum(sum(L1.*f1))./num_usuarios;

%% Femtocelda inferior
X2 = (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L2);
Q_E2 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X2);
f2 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E2;
E_inter2 = k.*alpha.*sum(sum(L2.*f2))./num_usuarios;

%% 3 Femtoceldas edificio lateral
X3= (1./sqrt(sigma^2)).*10.*log10(L3);
Q_E3 = qfunc(betha*sqrt(sigma^2)+X3);
f3 = exp((betha*sigma)^2/2).* Q_E3;
E_inter3 = (18/63).*(k.*alpha.*sum(sum(L3.*f3)));

%% Macrocela
num_usuarios = 4;
sigma = sigma_macro;
%% No se tiene en cuenta el efecto en estos cálculos de la función Q
porque los usuario externos se consideran únicos de la macrocela
%% y no tienen permiso para conectarse con la femtocelda.

E_inter4 = k.*alpha.*sum(sum(L4))./num_usuarios;

for j =1:length(sigmac)

    p(j)= exp(2*betha^2*sigmac(j)^2);
    q(j) = exp(betha^2*sigmac(j)^2);

    %% ----- CÁLCULO DE LA VARIANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR

    Var_intra(j) = p(j).*alpha-q(j).*alpha.^2;

```

```

%% ----- CÁLCULO DE LA VARIANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR

%% Femtocelda superior
num_usuarios = 21;
sigma = sigma_femto;

Q_Var1 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X1);
g1 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var1;

Var_inter1(j) = sum(sum(L1.^2.*(p(j).*alpha.*g1-
q(j).*alpha.^2.*f1.^2)))/num_usuarios;

%% Femtocelda inferior
Q_Var2 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X2);
g2 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var2;

Var_inter2(j) = sum(sum(L2.^2.*(p(j).*alpha.*g2-
q(j).*alpha.^2.*f2.^2)))/num_usuarios;

%% 3 Femtoceldas del edificio lateral
Q_Var3 = qfunc(2*betha*sqrt(sigma^2)+X3);
g3 = exp(2*(betha*sigma)^2).* Q_Var3;

Var_inter3(j) = (18/63).*sum(sum(L3.^2.*(p(j).*alpha.*g3-
q(j).*alpha.^2.*f3.^2))));

%% Macrocelda
sigma = sigma_macro;
num_usuarios = 4;

%% Para el calculo de la varianza ocurre los mismo que para el caso
de la esperanza no se tiene en cuenta la posibilidad de conexiones con la
%% femtocelda de usuarios macrocelda.

Var_inter4(j) = sum(sum(L4.^2.*(p(j).*alpha-
q(j).*alpha.^2)))/num_usuarios;

%% Cálculo de la esperanza y varianza total de interferencia dentro
del edificio para el servicio estudiado

E_total = E_intra + E_inter1 + E_inter2 + 2.*E_inter3;
Var_total = Var_intra + Var_inter1 + Var_inter2+2.*Var_inter3;

outage = 0.01:0.01:0.9;

for i = 1:length(outage)

    A(i) = qfuncinv(outage(i));

    for N = 1:0.01:1000
        Eb_N0 = (Prx./(Prx.*(N.*E_total(j) +
num_usuarios_macro.*E_inter4) + Pn +
A(i)*Prx.*sqrt(Var_total(j).*N+num_usuarios_macro.*Var_inter4(j))))).*Gp;

        if (Eb_N0 < eb)
            break;
        end
    end
end

```

```

        end
        C(j,i) = N-0.01;
    end

end

semilogy(C(1,:), outage)
hold on
semilogy(C(2,:), outage, ['r', '--']);

C(1,1)
C(2,1)
%% Representación de datos
axis([30 C(1,end) 0.01 1])
title(['\bf', int2str(num_usuarios_macro), '\bf usuarios MUE a',
'int2str(d_u_to_edificio), ' m'])
ylabel('\bf Probability of outage');
xlabel('\bf Voice users');
legend('\bf \sigma_c = 0.5 dB', '\bf \sigma_c = 1.0 dB', 2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Marta Anaya de Paz
%%
%%                               * Femtoceldas de UMTS *
%%
%%
%%
%%      Cálculo de la capacidad DOWNLINK femtocelda para los distintos
servicios    %%
%%      ESCENARIO: Interferencia intra
%%
%%      + interferencia inter-femtoceldas en el mismo edificio
%%
%%      + interferencia inter edificios laterales
%%
%%      + interferencia inter edificios posteriores
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
close all
clear all

%% Datos

%% Datos
f = 2.1*10^9;           % Frecuencia enlace descendente (Hz)
c = 3*10^8;            % Velocidad de la luz (m/s)
lambda = c/f;          % Longitud de onda (m)

cd0=0.5;               % Coeficiente de correlación inter-
femtocelda, valores [0 0.5]

```

```

sigma_sh = 3; % Desviación estandar de desvanecimiento por
sombra en interiores
sigma = sqrt(2*(1-cd0).*sigma_sh^2); % Desviación típica efectiva
betha = 0.23;

%% Datos para voz
alpha = 0.66; % Factor de ocupación del servicio de voz
Gp = 256; % Ganancia de procesado
Eb_NO_target= 7; % dB
eb = 10^(Eb_NO_target/10); % Unidades naturales
inc=100;
x=800;

% %% Datos para datos
% alpha = 1; % Factor de ocupación del servicio de datos
% Gp = 32; % Ganancia de procesado
% Eb_NO_target= 3; % dB
% eb = 10^(Eb_NO_target/10); % Unidades naturales
% inc = 10;
% x=150;

%% Datos femtocelda
Ptx_femto_max = 200; % mW
Piloto = 0.1*Ptx_femto_max; % Potencia de piloto en mW
% Potencia transmitida a los usuarios femtocelda en mW
Ptx_femto = (1-(Piloto/Ptx_femto_max))*Ptx_femto_max;
phi = [0.8 0.9]; % Factor de ortogonalidad valores = [0.5
0.9]
Pn = 10^(-10); % Potencia de ruido en el receptor FUE en
dBm

%% Datos modelo de propagación interior
h_usuario = 1.5; % Altura de usuario en m
b=0.46; % Constante para cálculo pérdidas por
planta
L_planta = 18.3; % Pérdidas por planta (dB)
L_pared = 6.9; % Pérdidas por pared (dB)
dref =1; % Distancia de referencia (m)
num_planta = 3; % Plantas físicas servidas por
femtocelda
num_plantas = (num_planta-1)/2; % Número máximo de plantas atravesadas
por un usuario

%% Cálculo pérdidas de propagación del modelo multi-pared

% Pérdidas a una distancia de referencia (dref = 1m)
Lref = 20*log10(4*pi*dref/lambda);
% Pérdida máxima de un usuario femtocelda: usuario más alejado
Lpmax =Lref + 20*log10(sqrt((6+3.*3).^2+(3*(num_plantas+1)-
h_usuario).^2))+L_pared.*3+(num_plantas.^(-
b+(num_plantas+2)./(num_plantas+1))).*L_planta;
lpmax = 10^(Lpmax/10);

%% Llamada a la función que calcula las pérdidas desde la femtocelda a
sus
%% usuarios y las pérdidas desde las femtoceldas interferentes hasta los
%% usuarios de la femtocelda central bajo estudio

[L, L_femto_inf,L_femto_sup] = calculo_perdidas();
l=10.^(L./10);

```

```

l_femto_inf = 10.^(L_femto_inf./10);

%% Cálculo del usuario que sufre más interferencia por parte de la
femtocelda superior
B = L_femto_sup-L(1,:);
min_B = find(min(B));
l_femto_sup = 10^(L_femto_sup(min_B)/10);

%% Llamada a la función que calcula las pérdidas que sufre la señal
%% procedente de las femtoceldas interferentes del edificio adyacente
Lfachada = 12;
d_edificios = 0;
[Lintsup Lintcentral Lintinf]
=calculo_perdidas_edificio_adyacente(Lfachada,d_edificios);
lintsup = 10^(Lintsup/10);
lintcentral = 10^(Lintcentral/10);
lintinf = 10^(Lintinf/10);
l_femto_adyacente = [lintsup lintcentral lintsup];
num_edificios_adyacentes = 2;

% Normalizamos todas las pérdidas a la máxima y sumamos
A = inc.*sum(sum(l./lpmax));

k_e=exp((betha.^2*sigma.^2)/2);

%%
%% Cálculo de la capacidad teniendo en cuenta la esperanza y varianza de
interferencia

%% ----- ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
% La esperanza intracelular vendrá dada por la potencia transmitada al
resto de usuarios más el piloto
% Consideramos como esperanza de la interferencia intracelular la
potencia de interferencia calculada anteriormente

E_intra = ((Piloto+((A-1)/A)*Ptx_femto)*(1-phi))/lpmax;

%% ----- VARIANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
% La varianza intracelular no existe en downlink ya que el usuario sólo
recibe una única señal procedente de la femtocelda,
% no existen varios caminos

%% ----- ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR
% Cálculo esperanza de la interferencia intercelular de las femtoceldas
de nuestro edificio

E_inter1 = (l_femto_inf/l_femto_sup).*(Ptx_femto_max/l_femto_inf);
E_inter2 = Ptx_femto_max/l_femto_inf;

% Cálculo de la esperanza de la interferencia intercelular de las
femtoceldas del edificio adyacente

E_inter3 = Ptx_femto_max*(1/lintinf+1/lintsup+1/lintcentral);

E_inter_total = E_inter1+E_inter2+ num_edificios_adyacentes.*E_inter3;

```



```

%% ----- VARIANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR
%% En este caso sí existe varianza intercelular porque el usuario
recibirá una señal por cada femtocelda interferente

% Cálculo varianza de la interferencia intercelular de las femtoceldas
de nuestro edificio

k_v=exp(2.*betha.^2*sigma.^2);

Var_inter1 =
((l_femto_inf/l_femto_sup).*(Ptx_femto_max/l_femto_inf).^2).*(k_v-
k_e.^2);
Var_inter2 = ((Ptx_femto_max/l_femto_inf).^2).*(k_v-k_e.^2);

for i = length(l_femto_adyacente)
    Var_inter3(i) = ((Ptx_femto_max./l_femto_adyacente(i)).^2).*(k_v-
k_e.^2);
end

%% Cálculo de la varianza total teniendo en cuenta la interferencia inter
de nuestro edificio y de los dos edificios adyacentes
Var_inter_total
=Var_inter1+Var_inter2+num_edificios_adyacentes.*sum(Var_inter3);

share = 1/A;
interferencia = 1-share;
ABC = 1+(1-interferencia)

%% ----- CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PARA LOS SERVICIOS DE VOZ O DATOS EN
%% FUNCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE DESBORDAMIENTO

outage = 0.01:0.01:0.9;
for j = 1:length(phi)

    for i = 1:length(outage)

        Q_1(i) = qfuncinv(outage(i));

        C_I4(j,i) =
(Ptx_femto/(lpmax*A*alpha))./((E_intra(j)+k_e.*(E_inter1+E_inter2)+
Q_1(i)).*sqrt(Var_inter1+Var_inter2))+Pn);
        C_I5(j,i) =
(Ptx_femto/(lpmax*A*alpha))./((E_intra(j)+k_e.*(E_inter_total)+
Q_1(i)).*sqrt(Var_inter_total))+Pn);

        Eb_N04(j,i) = C_I4(j,i).*Gp;
        C4(j,i) = (Eb_N04(j,i)./eb).*21*inc*ABC;

        Eb_N05(j,i) = C_I5(j,i).*Gp;
        C5(j,i) = (Eb_N05(j,i)./eb).*21*inc*ABC;
    end
end

display('----- Capacidad con interferencia
interfemtocelda del propio edificio')

```

```

C4(1,1)
C4(2,1)
display('----- Capacidad con interferencia
interfemtocelda de edificios adyacentes')
C5(1,1)
C5(2,1)

%% Representación de los resultados

semilogy(C4(1,:),outage)
hold on
semilogy(C4(2,:),outage,['r','--']);

ylabel('\bf Probability of outage');
xlabel('\bf Voice users');
legend('\bf \phi = 0.8', '\bf \phi = 0.9',4);
axis([x C4(2,end) 0.01 1])

figure
semilogy(C5(1,:),outage)
hold on
semilogy(C5(2,:),outage,['r','--']);

ylabel('\bf Probability of outage');
xlabel('\bf Voice users');
legend('\bf \phi = 0.8', '\bf \phi = 0.9',4);
axis([x C4(2,end) 0.01 1])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Marta Anaya de Paz
%%
%%                               * Femtoceldas de UMTS *
%%
%%
%%      Cálculo de la capacidad DOWNLINK femtocelda para los distintos
servicios  %%
%%      ESCENARIO: Interferencia intra
%%
%%      + interferencia inter-femtoceldas en el mismo edificio
%%
%%      + interferencia macrocelda
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
close all
clear all

%% Datos
f = 2.1*10^9;           % Frecuencia enlace descendente (Hz)
c = 3*10^8;            % Velocidad de la luz (m/s)
lambda = c/f;          % Longitud de onda (m)

```

```

cd0=0.5; % Coeficiente de
correlación inter-femtocelda, valores [0 0.5]
sigma_sh_interior = 3; % Desviación estandar de
desvanecimiento por sombra en interiores
sigma_interior = sqrt(2*(1-cd0).*sigma_sh_interior^2); % Desviación
típica efectiva
sigma_sh_macro = 8; % Desviación típica de
desvanecimiento por sombra para macroceldas
sigma_femto_macro = sqrt((sigma_sh_interior-sigma_sh_macro)^2+ 2*(1-
cd0).*sigma_sh_interior*sigma_sh_macro);
betha = 0.23;

%% Datos para voz
alpha = 0.66; % Factor de ocupación del servicio de voz
Gp = 256; % Ganancia de procesamiento
Eb_N0_target= 7; % dB
eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
inc = 100;

% %% Datos para datos
% alpha = 1; % Factor de ocupación del servicio de datos
% Gp = 32; % Ganancia de procesamiento
% Eb_N0_target= 3; % dB
% eb = 10^(Eb_N0_target/10); % Unidades naturales
% inc = 10;

%% Datos femtocelda
Ptx_femto_max = 1000; % mW
Piloto = 0.1*Ptx_femto_max;
% Potencia transmitida a los usuarios femtocelda en mW
Ptx_femto = (1-(Piloto/Ptx_femto_max))*Ptx_femto_max;
phi = 0.9; % Factor de ortogonalidad valores = [0.5 0.9]
Pn = 10^(-10); % Potencia de ruido en el receptor FUE en dBm

%% Datos modelo de propagación interior
h_usuario = 1.5; % m
b=0.46; % constante para cálculo pérdidas por
planta
L_planta = 18.3; % Pérdidas por planta (dB)
L_pared = 6.9; % Pérdidas por pared (dB)
dref =1; % Distancia de referencia (m)
num_planta = 3; % Plantas físicas servidas por
femtocelda
num_plantas = (num_planta-1)/2; % Número máximo de plantas atravesadas
por un usuario

%% Cálculo pérdidas de propagación del modelo multi-pared

% Pérdidas a una distancia de referencia (dref = 1m)
Lref = 20*log10(4*pi*dref/lambda);
% Pérdida máxima de un usuario femtocelda: usuario más alejado
Lpmax =Lref + 20*log10(sqrt((6+3.*3).^2+(3*(num_plantas+1)-
h_usuario).^2))+L_pared.*3+(num_plantas.^(-
b+(num_plantas+2)./(num_plantas+1))).*L_planta;
lpmax = 10^(Lpmax/10);

```

```

%% Datos enlace BS -> FUE

Ptx_macro = (20*10^3)/3;           % Potencia máxima transmitida (mW)
por la BS interferente en un sector
G_macro = 17;                       % Ganancia BS (dBi)
d_macro_edificio = [100:50:1000]; % Distancia entre BS y edificio (m)
L_fachada = 12;                     % Pérdidas por fachadas (dB)
k=1.28;                             % k para margen por shadowing del 90%
n_macro = 3.52;                     % Coeficiente de propagación para
comunicaciones móviles
M_shad = k*sigma_sh_macro;          % Margen por shadowing para
macrocelda
ht = 30;                            % Altura BS (m)
hr = 9;                             % Altura usuario FUE dentro del
edificio
cm = 3;                             % Factor de corrección por ciudades
grandes

%% Cálculo pérdidas de propagación del enlace BS -> FUE

a_hr = 3.2.*((log10(11.75*hr))^2)-4.97;
a10 = 3.2.*((log10(11.75*10))^2)-4.97;
Lpmacro10 = 46.3 + 33.9.*log10(f/10^6) -13.82.*log10(ht) - a10+
10.*n_macro.*log10(d_macro_edificio./10^3)+cm+L_fachada;
Lfs = 92.45+20*log10(f/10^9)+20.*log10(d_macro_edificio./1000);

if hr < 10
    Lpmacro = 46.3 + 33.9*log10(f/10^6) -13.82*log10(ht) - a_hr+
10.*n_macro.*log10(d_macro_edificio./10^3)+cm+k*sigma_sh_macro*(1-
hr/ht)+L_fachada;
elseif (hr > 10 && hr < ht)
    Lpmacro = Lpmacro10 - (((Lpmacro10-Lfs)./(ht-10)).*(hr-
10))+k*sigma_sh_macro*(1-hr/ht);
else
    Lpmacro = Lfs + Lfachada;
end

lpmacro = 10.^(Lpmacro./10);

%% Llamada a la función que calcula las perdidas desde la femtocelda a
sus
%% usuarios y las pérdidas desde las femtoceldas interferentes hasta los
%% usuarios de la femtocelda central bajo estudio

[L, L_femto_inf,L_femto_sup] = calculo_perdidas();
l=10.^(L./10);
l_femto_inf = 10.^(L_femto_inf./10);

%% Cálculo del usuario que sufre más interferencia por parte de la
femtocelda superior
B = L_femto_sup-L(1,:);
min_B = find(min(B));
l_femto_sup = 10^(L_femto_sup(min_B)/10);

%% Llamada a la función que calcula las perdidas que sufre la señal
%% procedente de las femtoceldas interferentes del edificio adyacente

```

```

d_edificios = 0;
[Lintsup Lintcentral Lintinf]
=calculo_perdidas_edificio_adyacente(L_fachada,d_edificios);
lintsup = 10^(Lintsup/10);
lintcentral = 10^(Lintcentral/10);
lintinf = 10^(Lintinf/10);
l_femto_adyacente = [lintsup lintcentral lintsup];
num_edificios_adyacentes = 2;

%% Cálculo de la capacidad teniendo en cuenta la esperanza y varianza de
interferencia

% Normalizamos todas las pérdidas a la máxima y sumamos
A = inc.*sum(sum(l./lpmax));

k_e =exp((betha.^2*sigma_interior.^2)/2);

%%
%% Cálculo de la capacidad teniendo en cuenta la esperanza y varianza de
interferencia

%% ----- ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
% La esperanza intracelular vendrá dada por la potencia transmitida al
resto de usuarios más el piloto
% Consideramos como esperanza de la interferencia intracelular la
potencia de interferencia calculada anteriormente

E_intra = ((Piloto+((A-1)/A)*Ptx_femto)*(1-phi))./lpmax;

%% ----- VARIANZA DE INTERFERENCIA INTRACELULAR
% La varianza intracelular no existe en downlink ya que el usuario sólo
recibe una única señal procedente de la femtocelda,
% no existen varios caminos

%% ----- ESPERANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR
% Cálculo esperanza de la interferencia intercelular de las femtoceldas
de nuestro edificio

E_inter1 = (l_femto_inf/l_femto_sup).*(Ptx_femto_max/l_femto_inf);
E_inter2 = Ptx_femto_max/l_femto_inf;

% Cálculo de la esperanza de la interferencia intercelular de las
femtoceldas del edificio adyacente

E_inter3 = Ptx_femto_max*(1/lintinf+1/lintsup+1/lintcentral);

E_inter_total = k_e.*(E_inter1+E_inter2+
num_edificios_adyacentes.*E_inter3);

%% ----- VARIANZA DE INTERFERENCIA INTERCELULAR
%% En este caso sí existe varianza intercelular porque el usuario
recibirá una señal por cada femtocelda interferente

% Cálculo varianza de la interferencia intercelular de las femtoceldas
de nuestro edificio

k_v=exp(2.*betha.^2*sigma_interior.^2);

```

```

Var_inter1 =
((l_femto_inf/l_femto_sup).*(Ptx_femto_max/l_femto_inf).^2).*(k_v-
k_e.^2);
Var_inter2 = ((Ptx_femto_max/l_femto_inf).^2).*(k_v-k_e.^2);
Var_inter_propio = [Var_inter1 Var_inter2];

for i = length(l_femto_adyacente)
    Var_inter3(i) = ((Ptx_femto_max./l_femto_adyacente(i)).^2).*(k_v-
k_e.^2);
end

%% Cálculo de la varianza total teniendo en cuenta la interferencia inter
de nuestro edificio y de los dos edificios adyacentes
Var_inter_total
=Var_inter1+Var_inter2+num_edificios_adyacentes.*sum(Var_inter3);

%% ----- ESPERANZA DE INTERFERENCIA MACROCELDA

% Potencia recibida en el peor usuario femtocelda de la BS
pr_macro=(Ptx_macro./lpmacro);
Pr_macro=10*log10(pr_macro)+G_macro;
% Potencia recibida en el peor usuario femtocelda de su FAP
pr_femto = Ptx_femto/(lpmax*A*alpha);
Pr_femto=10*log10(pr_femto);

k_e=exp((betha.^2*sigma_femto_macro.^2)/2);
E_inter_macro = k_e.*pr_macro;

%% ----- VARIANZA DE INTERFERENCIA MACROCELDA
k_v=exp(2.*betha.^2*sigma_femto_macro.^2);

Var_inter_macro = ((pr_macro).^2).*(k_v-k_e.^2);

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculo de la relación señal a interferencia con interferencia
%% interfemtocelda de las femtoceldas superior e inferior del mismo
%% edificio teniendo en cuenta la esperanza y la varianza de
interferencia
%% dependiendo del valor de outage

share = 1/A;
interferencia = 1-share;
ABC = 1+(1-interferencia)

k_e =exp((betha.^2*sigma_interior.^2)/2);

outage = 0.01:0.01:0.9;

for j = 1:length(Lpmacro)

```

```

for i = 1:length(outage)

    Q_1(i) = qfuncinv(outage(i));

    C_I4(j,i) = (Ptx_femto/(lpmax*A*alpha))./((E_intra+k_e.*(E_inter1
+ E_inter2)+E_inter_macro(j)+
Q_1(i).*sqrt(Var_inter1+Var_inter2+Var_inter_macro(j)))+Pn);
    C_I5(j,i) =
(Ptx_femto/(lpmax*A*alpha))./((E_intra+E_inter_total+E_inter_macro(j)+
Q_1(i).*sqrt(Var_inter_total+Var_inter_macro(j)))+Pn);
    Eb_N04(j,i) = C_I4(j,i).*Gp;
    C4(j,i) = (Eb_N04(j,i)./eb).*21*inc*ABC;
    Eb_N05(j,i) = C_I5(j,i).*Gp;
    C5(j,i) = (Eb_N05(j,i)./eb).*21*inc*ABC;
end

end
display('----- Capacidad con interferencia
interfemtocelda del propio edificio')
C4(1,1)
C4(2,1)
display('----- Capacidad con interferencia
interfemtocelda de edificios adyacentes')
C5(1,1)
C5(2,1)

```


Anexo B: Publicaciones

Bazil Taha Ahmed, Marta Anaya de Paz, *“UMTS Multi-Service Uplink Capacity and Interference Statistics of Femtocells”*, Wireless Personal Communication Journal, 2º ronda de revision.

Wireless Personal Communications
UMTS Multi-Service Uplink Capacity and Interference Statistics of Femtocells
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	WIRE2600R1
Full Title:	UMTS Multi-Service Uplink Capacity and Interference Statistics of Femtocells
Article Type:	Manuscript
Keywords:	UMTS, Uplink capacity, Femtocells
Corresponding Author:	Bazil Taha Ahmed, Ph.D Universidad Autonoma de Madrid Madrid, Madrid SPAIN
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad Autonoma de Madrid
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Bazil Taha Ahmed, Ph.D
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Bazil Taha Ahmed, Ph.D Marta Anaya de Paz, B. Sc
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	In this work, the multiservice uplink capacity of single and multiple femtocells is given. The COST231 multiwall and floor indoor propagation model has been used to calculate the indoor propagation loss. The uplink capacity of a deployed femtocell will reduce by 2% if two femtocells are deployed in the same building up and lower of it. It is noticed that the uplink capacity is little bit affected if there are several femtocells in the buildings around the one at which the femtocell under study is deployed. It is noticed that uplink capacity is interference limited if the femtocell is deployed to serve the users in three floors. Uplink capacity will be interference and noise limited if the femtocell is deployed to serve the users in five floors. It is found that the effect of the interference due to the uniformly distributed users within the macrocell around the femtocell is insignificant.

UMTS Multi-Service Uplink Capacity and Interference Statistics of Femtocells

Bazil Taha Ahmed and Marta Anaya de Paz

Universidad Autonoma de Madrid- Escuela Politecnica Superior

Abstract: In this work, the multiservice uplink capacity of single and multiple femtocells is given. The COST231 multiwall and floor indoor propagation model has been used to calculate the indoor propagation loss. The uplink capacity of a deployed femtocell will reduce by 2% if two femtocells are deployed in the same building up and lower of it. It is noticed that the uplink capacity is little bit affected if there are several femtocells in the buildings around the one at which the femtocell under study is deployed. It is noticed that uplink capacity is interference limited if the femtocell is deployed to serve the users in three floors. Uplink capacity will be interference and noise limited if the femtocell is deployed to serve the users in five floors. It is found that the effect of the interference due to the uniformly distributed users within the macrocell around the femtocell is insignificant.

Keywords: UMTS, Uplink capacity, Femtocells, Power control, Indoor propagation.

1- Introduction

In this section we will present a brief idea about UMTS (Universal Mobile Telecommunications Service) system and femtocells. The related work with his subject and the main contribution of this work will be also presented.

First of all let us give a brief description of the UMTS system. UMTS is a third-generation (3G) broadband, packet-based transmission of text, digitized voice, video, and multimedia. UMTS offers a consistent set of services to mobile computer and phone users, no matter where they are located in the world. It is endorsed by major standards bodies and manufacturers as the planned standard for mobile users around the world. Once UMTS is fully available, computer and phone users can be constantly attached to the Internet wherever they travel and, as they roam, will have the same set of capabilities. The electromagnetic radiation spectrum for UMTS has been identified as

frequency bands 1885-2025 MHz for future IMT-2000 systems, and 1980-2010 MHz and 2170-2200 MHz for the satellite portion of UMTS systems. UMTS uses the WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) technology with a capacity limited by interference.

Let us now give a brief description of femtocells. In telecommunications, a femtocell (also called Home NodeB) is a small cellular base station, typically designed for use in a home or small business. It connects to the service provider's network via broadband (such as DSL or cable). A femtocell allows service providers to extend service coverage to the indoor environment, especially where access would otherwise be limited or unavailable. Although much attention is focused on WCDMA, the concept is applicable to all standards, including GSM, CDMA2000, TD-SCDMA, WiMAX and LTE solutions.

1-1 Related work

The femtocell concept is studied in [1] and [2]. Authors of [3] overview the technical and business arguments for femtocells and describe the state of the art on each front. They also describe the technical challenges facing femtocell networks and give some preliminary ideas for how to overcome them.

In [4], femtocells deployment using WiMAX, UMTS and WiFi has been discussed. In [5], the UMTS femtocell capacity in massive deployments has been studied without taken into account the interference variance [See equation 6 of the reference]. In [6], the UMTS mutual interference between the macrocells and the femtocells has been studied. Here also, the effect of the interference variance has not been taken into account. In [7], the uplink coverage and capacity of UMTS femtocells in enterprise environment have been studied without taken into account the effect of the interference variance [See equation 5 of the reference]. In [1], the feasibility of user deployed femtocells in the same frequency band as an existing macrocell network has been investigated. Key requirements for co-channel operation of femtocells such as auto-configuration and public access have been discussed. A method for power control for pilot and data that ensures a constant femtocell radius in the downlink and a low pre-definable uplink performance impact to the macrocells has been proposed, and the theoretical performance of randomly deployed femtocells in such a hierarchical cell structure has been analyzed for one example of a cellular UMTS network using system level simulations. The resulting impact on the existing macrocellular network has been

also investigated. In [8], adaptive attenuation at the femtocell and limiting the Tx power of the femtocell users are proposed for uplink interference management. Coverage performance and capacity results are presented to quantify the benefits of femtocells. In [9], a two-tier UMTS network has been considered where a large number of deployed Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) femtocells are laid under macrocells where they share the same spectrum. The uplink of this hybrid network has been studied, and critical scenarios that give rise to substantial interference have been identified. The mechanism for generating the interference has been analyzed and guidelines for interference mitigation have been provided. The impacts of the cross-tier interference, especially caused by increased numbers of users and higher data rates has been evaluated in the multi-cell simulation environment in terms of the noise rise at the base stations, the cell throughput and the user transmit power consumption. Authors of [10] investigated the performance of open-access femtocell networks for different scenarios, where macrocell users were allowed to join a particular femtocell if it was preferable to do so. Both dedicated-channel and co-channel femtocell deployments were considered. They investigated different cell selection metrics, and argued that a capacity-based cell selection typically results in higher capacities for the users. Impact of wall penetration loss and how it relates to the capacities of indoor and outdoor users were also evaluated.

In a two tier cellular network – comprised of a central macrocell underlaid with shorter range femtocell hotspots – cross-tier interference limits overall capacity with universal frequency reuse. To quantify near-far effects with universal frequency reuse, work [11] derived a fundamental relation providing the largest feasible cellular Signal-to-Interference-Plus- Noise Ratio (SINR), given any set of feasible femtocell SINRs. It provided a link budget analysis which enables simple and accurate performance insights in a two-tier network. A distributed utility based SINR adaptation at femtocells was proposed in order to alleviate cross-tier interference at the macrocell from cochannel femtocells. Each femtocell maximizes their individual utility consisting of a SINR based reward less an incurred cost (interference to the macrocell). Numerical results showed greater than 30% improvement in mean femtocell SINRs.

Femtocells are assuming an increasingly important role in cellular coverage. Femtocells can be configured to be either open access or closed access. Obviously, the network operator would prefer an open access deployment since this provides an inexpensive way to expand their network capabilities, whereas the femtocell owner would prefer

closed access, in order to monopolize their femtocell capacity and backhaul. In [12], a novel analytical framework for studying this problem has been developed, and results show that the interests of the femtocell owner and the network operator are more compatible than typically believed in non-orthogonal multiple access (CDMA). Open access can typically provides gains of more than a factor of three for the home user by reducing the near-far problem experienced by the femtocell, resulting in a “win-win” scenario for overlaid open access femtocell deployments in modern CDMA networks.

In [13], authors investigated how femtocells can make conventional cellular networks *greener*. They presented an energy consumption modelling framework to evaluate total energy consumption in a cellular network with femtocells. Using the proposed framework, they investigated the energy consumption and performance of the cellular network with femtocells. They considered various network environments, including indoor propagation environment, user distribution near the femtocells, and a femtocell access policy, which have effect on the performance of the cellular network. Simulation results in the various environments show that femtocell is, in general, a greener technology that reduces the total energy consumption in a cellular network. They obtained system performance and energy consumption for three different scenarios: different femtocell penetration rate, different open access rate, and different cell coverage. They provided a guideline that helps system operators deploy and manage a cellular network with femtocells in greener way.

Work [14] proposed two interference mitigation strategies that adjust the maximum transmit power of femtocell users to suppress the cross-tier interference at a macrocell base station (BS). The open-loop and the closed-loop control suppress the cross-tier interference less than a fixed threshold and an adaptive threshold based on the noise and interference (NI) level at the macrocell BS, respectively. Simulation results show that both schemes effectively compensate the uplink throughput degradation of the macrocell BS due to the cross-tier interference and that the closed-loop control provides better femtocell throughput than the open-loop control at a minimal cost of macrocell throughput.

In [15], the UMTS multiservice uplink capacity of highways cigar-shaped microcells has been investigated taking into account the expected value and the variance of the interference.

1-2 Paper contribution

The main contribution of this paper is to calculate the multiservice uplink capacity of femtocells taking into account the expected value and the variance of the interference assuming that they use a frequency band that is not shared by the macrocells around them.

1-3 Paper organization

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, the used propagation loss model is presented. In Section 3, the uplink interference analysis is given. In Section 4, different numerical results are presented. Finally, Section 5 draws the conclusions.

2- Propagation Model

The electromagnetic propagation mechanism in femtocells is an indoor propagation. Thus an adequate propagation loss model has to be used to characterize the indoor channel. In our analysis, we will use the COST231 multi-wall and floor indoor propagation model (representing the most sophisticated empirical indoor propagation model) is used to determine the indoor propagation loss. The propagation loss L in dB is given by [16]:

$$L(\text{dB}) = L_{fs} + L_c + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left[\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - 0.46 \right] L_f + \xi \quad (1)$$

where

- L_{fs} is the free space loss between the transmitting antenna and the receiving one given in dB.
- L_c is constant loss.
- k_{wi} is the number of penetrated walls of type i .
- L_{wi} is the penetration loss of the walls of type i in dB.
- k_f is the number of penetrated floors.
- L_f is the floor penetration loss in dB.
- ξ is a Gaussian variable with zero mean and a standard deviation σ_{sh} representing the shadowing effect.

All walls intersecting the direct ray between transmitter and receiver are considered and for each wall individual material properties (and therefore L_w) are taken into account.

Here it can be noticed that the electrical number of floors is lower than the physical one when the physical number of floors is two or more. This is due to the fact that the exponent factor $\left[\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - 0.46 \right]$ is lower 1.

3- Uplink Analysis

In WCDMA systems, each femtocell controls the transmitted power of its users. If the interfering user i is at a distance r_{im} from its base station and at a distance r_{id} from the reference femtocell base station as shown in Fig. 1, then the ratio of the interference signal $L(r_{id}, r_{im})$ due to the distance and penetration loss is given as:

$$L(r_{id}, r_{im}) = 10^{(L_{im} - L_{id})/10} \quad (2)$$

where

- L_{im} is the propagation loss between the user i and the base station of femtocell m .
- L_{id} is the propagation loss between the user i and the base station of femtocell d .

Now, the ratio of the interference signal $L_{shd}(r_{id}, r_{im})$ due to the distance, penetration loss and shadowing is given by:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} L(r_{id}, r_{im}) \quad (3)$$

where $\xi_{id} = \xi_{im} = \xi$.

Let the mean value of the desired signal power received by the base station for a given service s be $P_{r,s}$. The mean value of the interference from an active user communicating with the reference microcell assuming the same service will be also $P_{r,s}$. A user i will not communicate with the reference base station of the femtocell d but rather with the base station of the femtocell m whenever the propagation loss between the user i and base station of femtocell m is lower than the propagation loss between the user i and the base station of the femtocell d , i.e., if $\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = 1$, where

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = \begin{cases} 1, & \text{if } L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

Assuming that each femtocell has a capacity of $N_{u,s}$ users per service s , the expected value of intercellular interference for a given service s is given as:

$$E[I_{inter}]_s = \alpha_s \sum_{n=1}^{N_{u,s}} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (5)$$

where

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = F\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi\left(\frac{\xi}{\xi_{im}}, r_{id}/r_{im}\right)\right] \quad (6)$$

$$= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \quad (7)$$

Where $\beta = \frac{\log_e 10}{10}$ and α_s is the activity factor of the user for the service s (0.66 for voice users and 1.0 for data users).

The value of σ^2 is given as:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_{sh}^2 \quad (8)$$

where C_{dm} is the shadowing inter-sites correlation coefficient.

$Q(x)$ is given by

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (9)$$

The expected value of the total intercellular interference power for the service s is given as:

$$E[P_{inter}]_s = P_{r,s} E[I_{inter}]_s \quad (10)$$

The expected value of the intracellular interference power due to the service s is given by:

A- If it is the service under study

$$E[P_{intra,s}] = P_{r,s} E[I_{intra}]_s = P_{r,s} \alpha_s (N_{u,s} - 1) \quad (11)$$

B- Else it is given as:

$$E[P_{intra,s}] = P_{r,s} E[I_{intra}]_s = P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} \quad (12)$$

Taking into account an imperfect power control with standard deviation error of σ_c (dB),

the total expected interference power for the service s will be:

$$E[P_{int}]_{k,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2 / 2} (E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s) \quad (13)$$

The expected value of the total interference power due to all services will be:

$$E[P_{int}]_k = \sum_{s=1}^S E[P_{int}]_{k,s} \quad (14)$$

where S is the number of the services that the system supports.

The variance of the intercellular interference power for the service s is given as:

$$\text{var}[P_{\text{inter}}]_s = P_{r,s}^2 \sum_{n=1}^{N_{u,s}} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q\alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} dr \quad (15)$$

where

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right]^2 \quad (16)$$

$$= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \quad (17)$$

$$p = e^{2\beta^2\sigma^2} \quad (18)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma^2} \quad (19)$$

The variance of the intracellular interference power due to the service s is calculated as:

$$\text{var}[P_{\text{intr}}]_s = (N_{u,s} - 1)P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (20)$$

The variance of the total interference power due to the service s is given by:

$$\text{var}[P_{\text{int}}]_s = \text{var}[P_{\text{inter}}]_s + \text{var}[P_{\text{intra}}]_s \quad (21)$$

The variance of the total interference power due to all service s is given by:

$$\text{var}[P_{\text{int}}] = \sum_{s=1}^S \text{var}[P]_{r,s} \quad (22)$$

Thus, for a given outage probability, the uplink carrier-to-interference ratio $\left[\frac{C}{I}\right]_s$ for a given service s is given as:

$$\left[\frac{C}{I}\right]_s = \frac{P_{r,s}}{P_N + E[P_{\text{int}}] + \gamma\sqrt{\text{var}[P_{\text{int}}]}} \quad (23)$$

Where P_N is the receiver noise power and γ is a factor that depends on the outage probability (2.05 for outage probability of 2% and it is 2.33 for an outage probability of 1%). In the denominator of (23), the first term represents the noise meanwhile the second and the third term represent the interference.

For a given service, the $(E_b/N_0)_s$ ratio is given as:

$$\left[\frac{E_b}{N_0}\right]_s = \left[\frac{C}{I}\right]_s G_{p,s} \quad (24)$$

Where $G_{p,s}$ is the processing gain of the service s.

Assuming a given number of users for each service, the relation (outage probability versus number of users) can be got using (23 and 24).

For mixed services of voice and data, the data user maximum transmitted power to the maximum transmitted power of the voice users given in dB should be:

$$\left(\frac{P_{td}}{P_{tv}} \right)_{dB} = (1 + \delta) \left[10 \log_{10} \left(\frac{G_{pv} / \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_v}{G_{pd} / \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_d} \right) \right] \quad (25)$$

Where

- P_{td} is the transmitted power of the data users the exists in the sector border,
- P_{tv} is the transmitted power of the voice users the exists in the sector border,
- δ is a constant with a value of 0.0 if only the mean value of the interference is considered. When the interference variance is also considered, it has a value of (-0.1 to 0.1) depending on the parameters of the services under study.
- G_{pv} is the voice service processing gain,
- G_{pd} is the data service processing gain,
- $(E_b/N_0)_v$ is the required (E_b/N_0) for voice service given in real numbers and
- $(E_b/N_0)_d$ is the required (E_b/N_0) for data service given in real numbers.

4- Numerical Results

We assume that the capacity of the femtocell is the number of simultaneous users that can be supported with an outage of 1%. To calculate the uplink capacity of the femtocell we have assumed the following:

- For data service

- $E_b/N_0 = 3$ dB
- $G_p = 32$
- $\alpha = 1.00$
- $P_{t-max} = 23$ dBm

- For voice service

- $E_b/N_0 = 7$ dB
- $G_p = 256$
- $\alpha = 0.66$
- P_{t-max} - to be calculated

- Interference and propagation parameters

- $\sigma_{sh} = 3$ dB
- $C_{dm} = 0.5$
- $L_w = 6$ dB
- $L_f = 18$ dB
- $L_{facade} = 10$ dB

In this section we will study the uplink capacity for single, three femtocells within the same building and 9 femtocells within three near buildings. Also we will present the effect of the around macrocell users upon the uplink capacity of the femtocell when they share the same frequency band.

Firstly, we will study the case of single femtocell scenarios shown in Figure 2. In this case the user under study suffers from only the intracellular interference. The femtocell is assumed to be deployed in three-floor building with a width of 25 m and a height of 10 m.

Fig. 4 shows the femtocell performance for voice users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 63.2 and 61.1 voice users respectively. In this case the maximum transmitted power has been calculated to be 17.9 dBm. It can be noticed that increasing σ_c from 0.5 dB to 1 dB reduces the uplink capacity by 3.3%.

Fig. 5 shows the femtocell performance for data users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 14.86 and 13.58 data users respectively. It can be noticed that increasing σ_c from 0.5 dB to 1 dB reduces the uplink capacity by 8.6%.

Fig. 6 shows the femtocell performance for a mixture of data users and voice users for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell capacity is 31.8 and 28.5 voice users respectively assuming that 7 data users are also exist within the femtocell.

If we consider a single femtocell deployed in a building of 5 floors, uplink capacity will be 13.67 data users for σ_c of 0.5 dB and 12.46 data users for σ_c of 1 dB. Uplink capacity

will be 57.5 voice users for σ_c of 0.5 dB and 55.6 voice users for σ_c of 1 dB. This indicates that uplink capacity is now limited by interference and noise.

Secondly, let us now study the case of three femtocells scenario shown in Fig. 3, where the femtocell under study is the central one. In this case the user under study will suffer from the intracellular interference due to the users of the central femtocell and intercellular interference due to the users of the upper and lower femtocells. The three femtocells have been deployed in nine-floor building with a width of 25 m and a height of 30 m.

Fig. 7 shows the femtocell performance for voice users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 61.9 and 59.9 voice users respectively. In this case the maximum transmitted power has been calculated to be 17.7 dBm. Comparing these results with those of Fig. 4, we can notice that the capacity reduction is 2% due to the intercellular interference caused by the users of the upper and lower femtocells.

Fig. 8 shows the femtocell performance for data users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 14.53 and 13.30 data users respectively. Comparing these results with those of Fig. 5, we can notice that the capacity reduction is 2.1% due to the intercellular interference caused by the users of the upper and lower femtocells.

Fig. 9 shows the femtocell performance for a mixture of data users and voice users for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 27.8 and 24.4 voice users respectively assuming that 7 data users are also exist within the femtocell.

It has been noticed that almost all of the intercellular interference is due to the users of the extra femtocells that exist at the nearest floor to the femtocell under study. If all of the extra femtocell users exist in the nearest floor to the femtocell under study, then, the uplink capacity reduction will be almost the triple of the uplink capacity reduction assuming a uniform distribution of users in the two extra femtocells. This case (almost impossible case) represents the worst case. The best case will be got when all of the extra femtocells users exist in the same floor of the femtocell node with almost null effect.

In a 15 floors building with 5 deployed femtocells, the uplink capacity of the central femtocell will be almost the same as its uplink capacity in the 3 femtocells scenario.

Thirdly, let us study the case when 9 femtocells exist within three contiguous buildings assuming that each one of them has a brick facet.

Fig. 10 shows the femtocell performance for voice users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 60.7 and 58.8 voice users respectively.

Fig. 11 shows the femtocell performance for data users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 14.22 and 13.03 data users respectively.

Comparing these results with the results shown in Figures 7 and 8 it can be noticed that the effect of the intercellular interference due to the users of the 6 femtocells within the lateral buildings is relatively small.

Fourthly, let us study the case when 9 femtocells exist within three near buildings (with a 25 m distance between each lateral building and the central one) assuming that each one of them has a glass facades with 6 dB insertion loss.

Fig. 12 shows the femtocell performance for voice users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 60.8 and 58.8 voice users respectively.

Fig. 13 shows the femtocell performance for data users only for two different σ_c namely 0.5 and 1 dB. It can be noticed that the femtocell uplink capacity is 14.24 and 13.05 data users respectively.

Comparing these results with the results given by Fig. 10 and 11, it can be noticed that the uplink capacity is almost the same.

If the distance between the buildings is reduced to 15m, uplink capacity reduces to 59.9 voice users and 58 voice users for σ_c of 0.5 dB and 1 dB respectively. Uplink capacity reduces to 14.02 data users and 12.85 data users for σ_c of 0.5 dB and 1 dB respectively.

Finally, let us study the effect of the interference due to the users of the macrocell around the femtocell assuming that both of them use the same frequency band. Here we will assume that the macrocell users are at the macrocell edge transmitting the

maximum possible power and they are only 10m from the building containing the femtocells. This scenario represents an extreme impractical case. Thus results represent the worst case uplink capacity. Propagation loss between the macrocell users and the femtocell is assumed to be the sum of the free space propagation loss and the indoor propagation loss dealing with the facade, walls and floors penetration losses.

Table 1 shows the femtocell uplink capacity for the data service as a function of the number of near data users within the macrocell. For 12 macrocell data users, the uplink capacity is reduced by only 5.6%.

Table 2 shows the femtocell uplink capacity for the voice service as a function of the number of near voice users within the macrocell. For 36 macrocell voice users, the uplink capacity is reduced by only 9.8%.

If the users of the macrocell around the femtocell are uniformly or almost uniformly distributed, the effect of their interference on the femtocell uplink capacity is insignificant (lower than the effect of one near macrocell user).

5- Conclusions

In this work, the multiservice uplink capacity of femtocells has been given for single and multiple femtocells. The uplink capacity of a deployed femtocell will reduce by 2% if two femtocells are deployed in the same building up and lower of it. It has been noticed that the uplink capacity is little bit affected if there are several femtocells in the buildings around the one at which the femtocell under study is deployed. It has been noticed that uplink capacity is interference limited if the femtocell is deployed to serve the users in three floors. Uplink capacity will be interference and noise limited if the femtocell is deployed to serve the users in five floors. It is shown that the uplink capacity is little bit affected by the interference due to macrocell users when they share the same frequency band used by the femtocells. It has been found that the effect of the interference due to the uniformly distributed users within the macrocell around the femtocell is insignificant.

References

- [1] H. Claussen, "Performance of Macro- and Co- Channel Femtocells in a Hierarchical Cell Structure," Proc. IEEE 18th Internat. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. (PIMRC '07), Athens, Greece, 2007.
- [2] H. Claussen, L. T. W. Ho, and L. G. Samuel, "An Overview of the Femtocell Concept," Bell Labs Tech. Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 221–245, 2008.
- [3] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Femtocell Networks: A survey". University of Texas of Austin Alan Gatherer, Junio 2008.
- [4] Q. Kalhoro, M. A. Kalhoro, S. Abbasi, K. Khoumabti, "Analysis of Femtocells Deployment with Different Air-Interfaces", 2010 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation, pp.439-443, 2010.
- [5] F. Duran and G. G. Carrasco, "UMTS Femtocell Performance in Massive Deployments: Capacity and GoS Implications", Bell Labs Technical Journal Vol. 14, No. 2, pp. 185–202, 2009.
- [6] Femto Forum "Interference Management in UMTS Femtocells", December 2008.
- [7] Z. Shi, M. Zhao, M. C. Reed, and H. Wang, "On the Uplink Coverage and Capacity of UMTS Femtocells in Enterprise Environment". Available at: www.nicta.com.au/pub?doc=4110.
- [8] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghathan and A. Richardson, "Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells", IEEE Communications Magazine, pp. 102-109, September 2009.
- [9] Z. Shi, M. C. Reed, M. Zhao, and H. Wang, "Uplink Interference Scenarios in Two-Tier Networks", 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), pp. 471-476, 2010.
- [10] H. A. Mahmoud, I. Güvenç, F. Watanabe, "Performance of Open Access Femtocell Networks with Different Cell-Selection Methods", VTC-2010-Spring, pp. 1-5.
- [11] V. Chadrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks" IEEE Trans. Wireless Commutations, Vol. 8, No. 8, pp. 4316-4328, August 2009.

- [12] P. Xia, V. Chandrasekhar, J.G. Andrews, "CDMA Uplink Capacity in both Open and Closed Access Two-tier Femtocell Networks", IEEE Globecom. 2010 Workshop on Femtocell Networks, pp. 648-652.
- [13] D. Chee; M. S. Kang; H. Lee; B. C. Jung, "A study on the Green Cellular Network with Femtocells" , Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp. 235-240, 2011 .
- [14] H. JO, C. Mun, J. Moon and J. G. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks," IEEE Trans. Wireless Communications, Vol. 8, No. 10, pp. 4906- 4910, Octubre 2009.
- [15] B. T. Ahmed and M. C. Ramón, "WCDMA Multiservice Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2007, pp. 1-8, 2007.
- [16] D. J. Cichon, T. Kürner , "Propagation Prediction Models", available at: www2.it.lut.fi/kurssit/04-05/010651000/Luennot/Chapter4.pdf

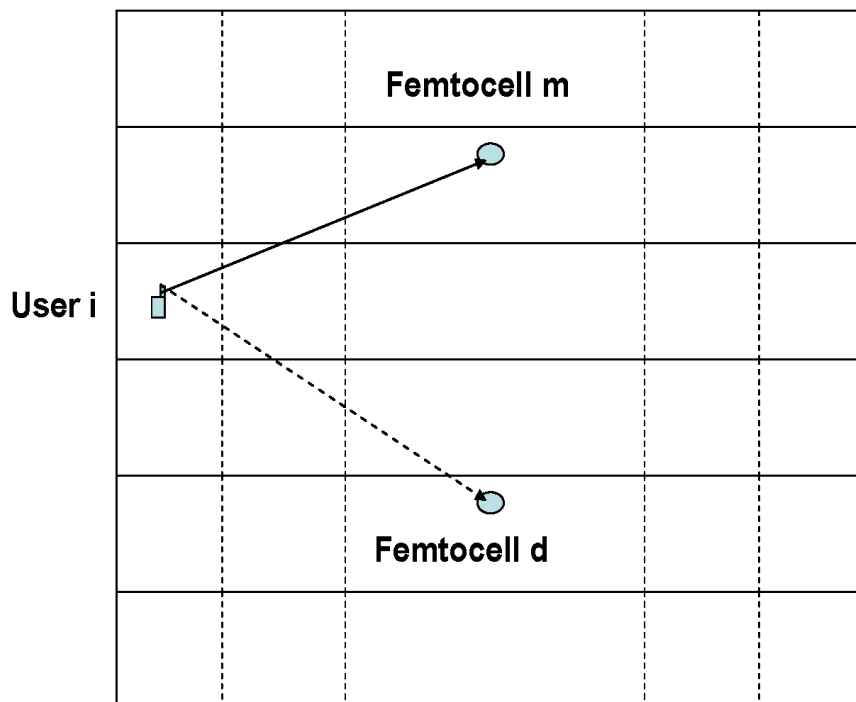


Fig. 1: Interference analysis.

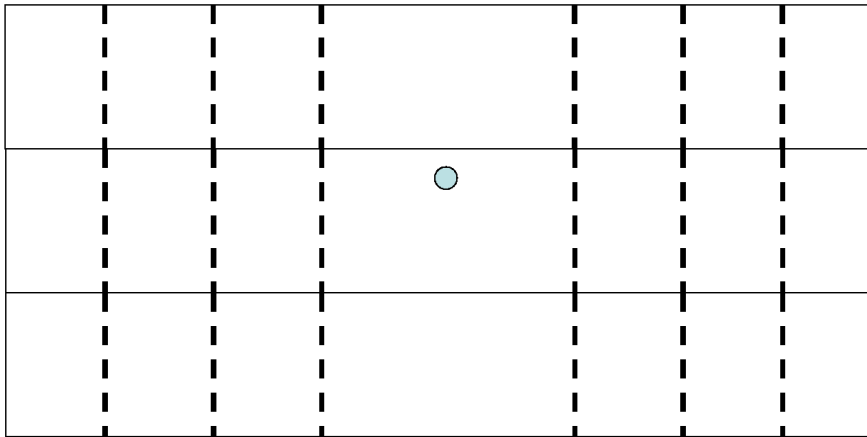


Fig. 2: Single femtocell configuration.

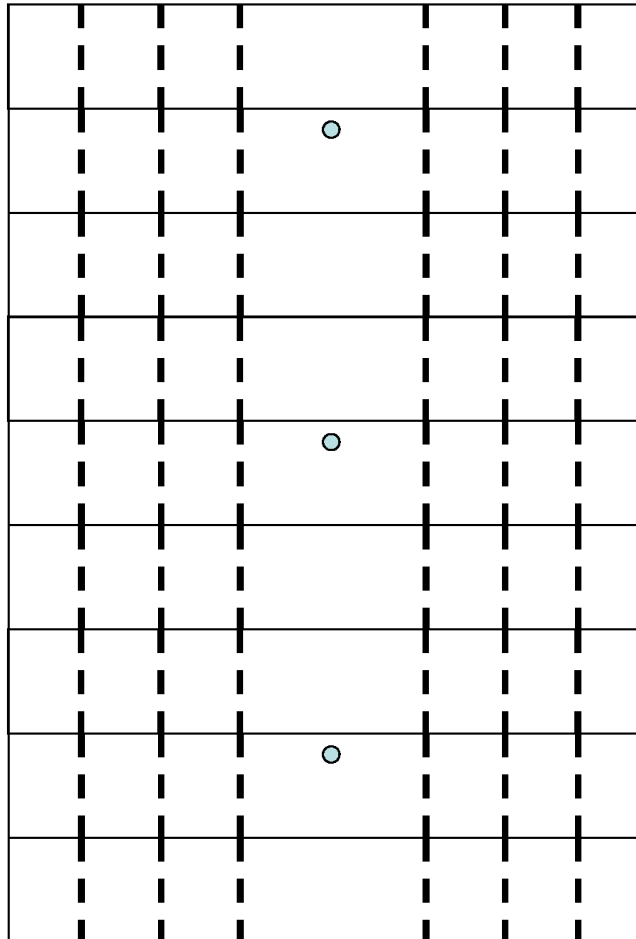


Fig. 3: Three femtocells configuration.

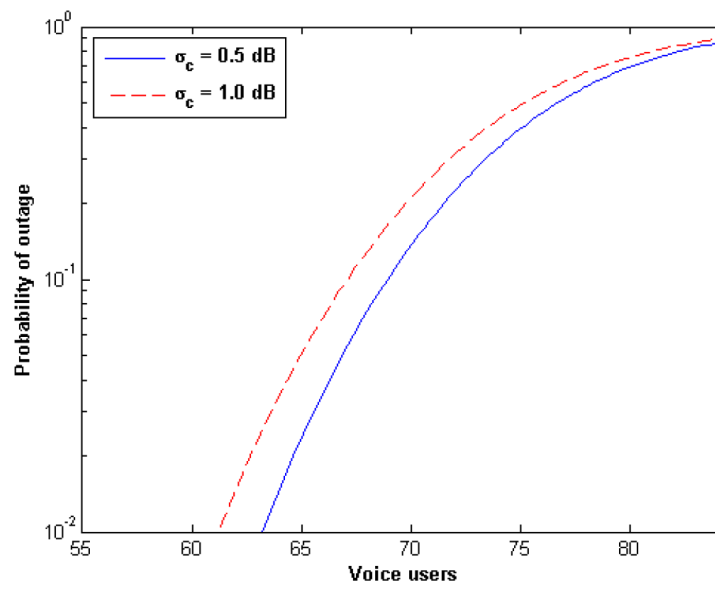


Fig. 4: Single femtocell performance for voice users only.

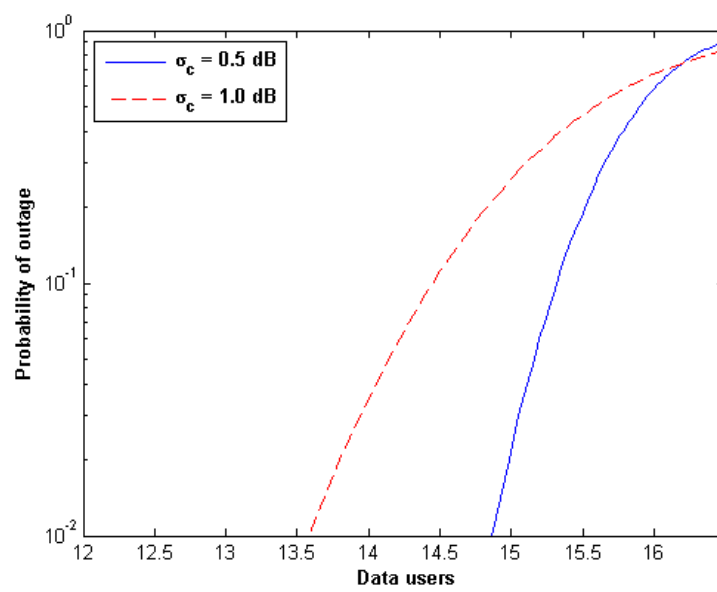


Fig. 5: Single femtocell performance for data users only.

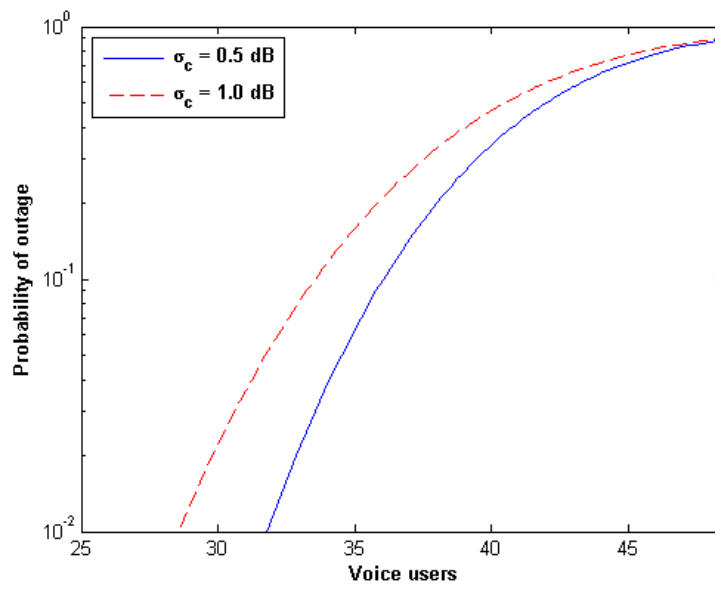


Fig. 6: Single femtocell performance for 7 data users and a given number of voice users.

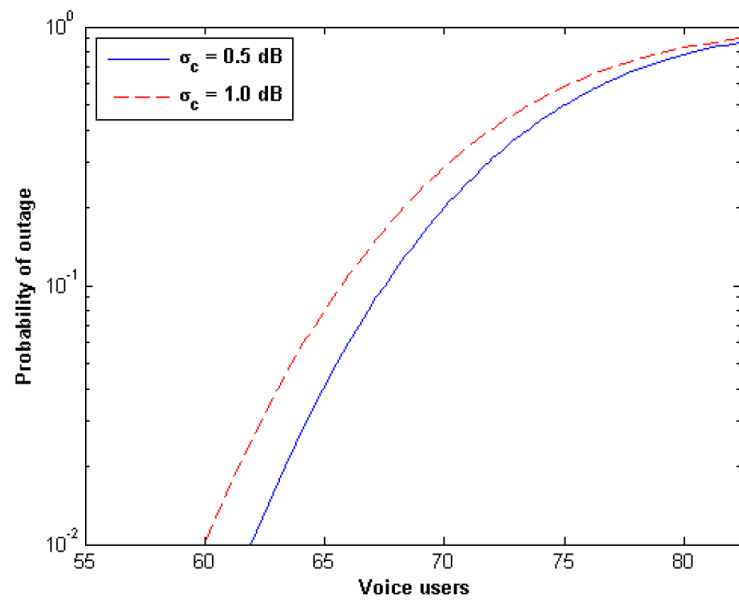


Fig. 7: Femtocell performance in the three femtocells scenario for voice users only.

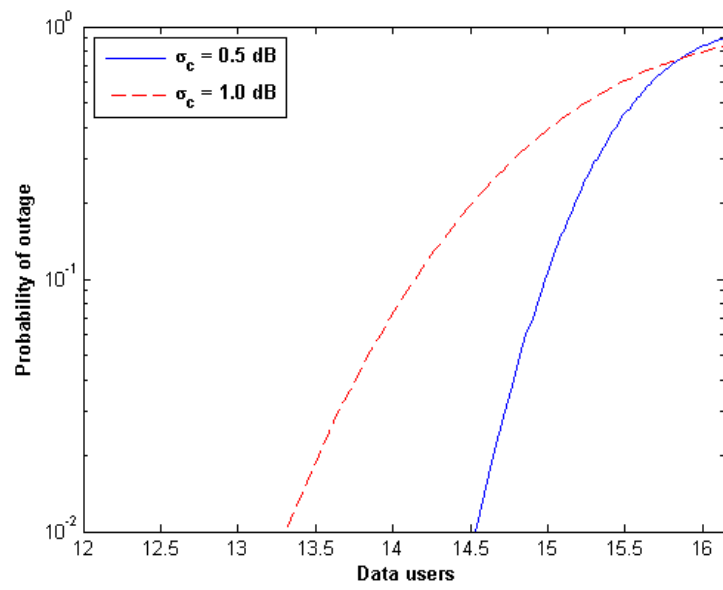


Fig. 8: Femtocell performance in the three femtocells scenario for data users only.

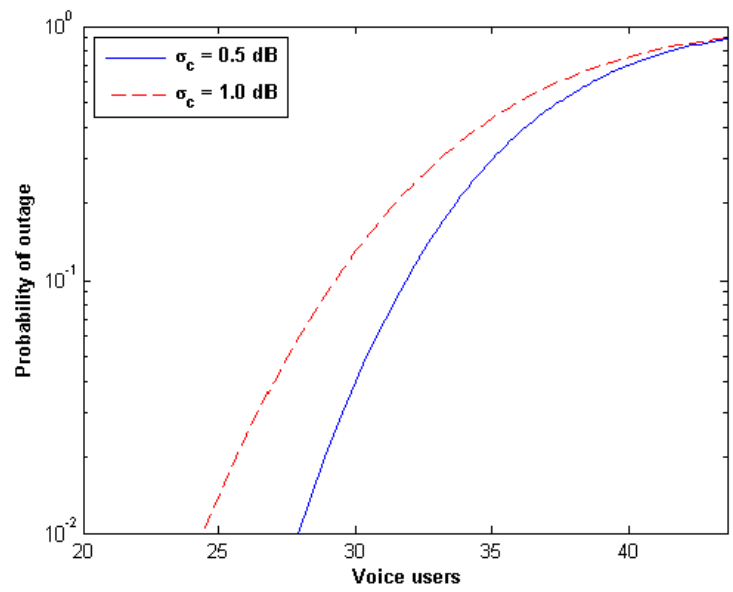


Fig. 9: Femtocell performance in the three femtocells scenario for 7 data users and a given number of voice users.

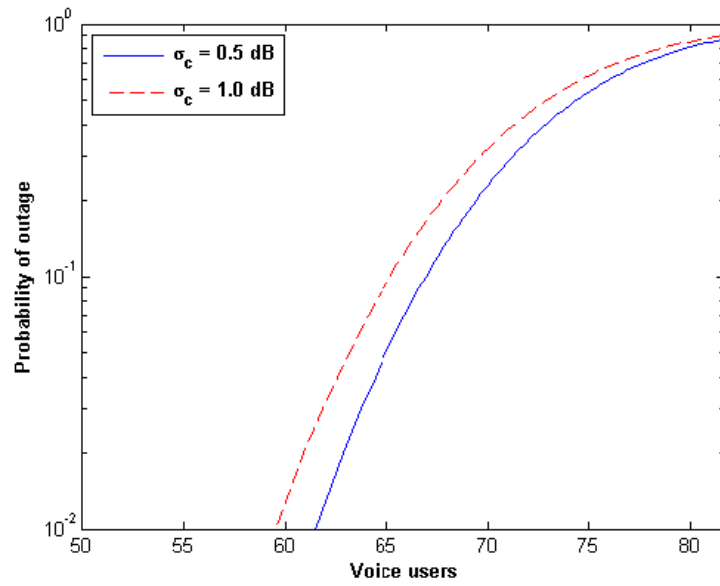


Fig. 10: Femtocell performance in the nine femtocells scenario for voice users only (for three building with brick facet).

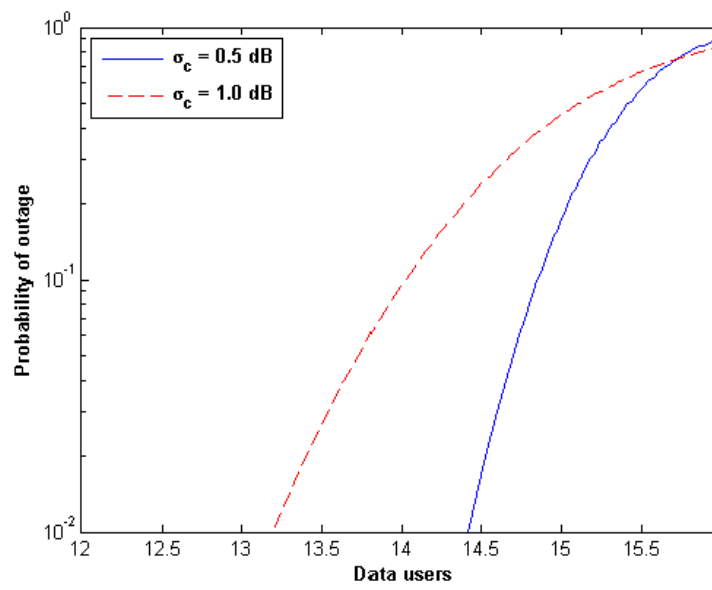


Fig. 11: Femtocell performance in the nine femtocells scenario for data users only (for three building with brick facet).

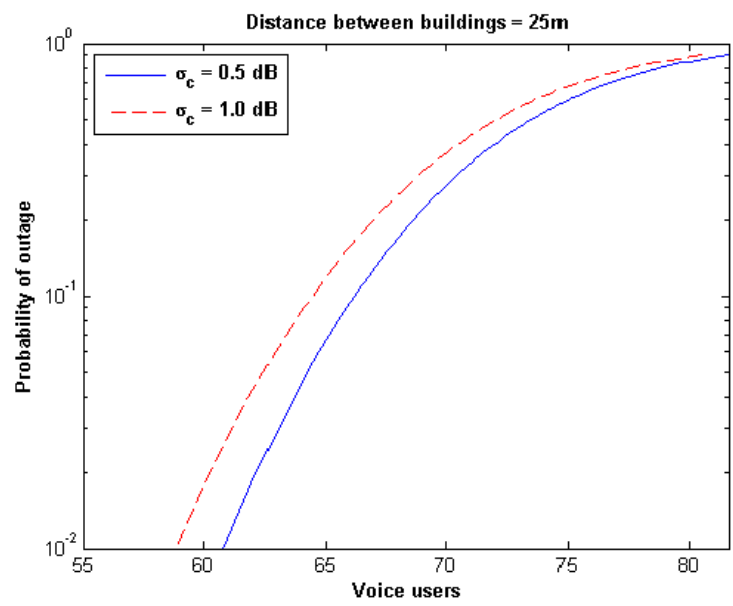


Fig. 12: Femtocell performance in the nine femtocells scenario for voice users only (for three building with glass facet).

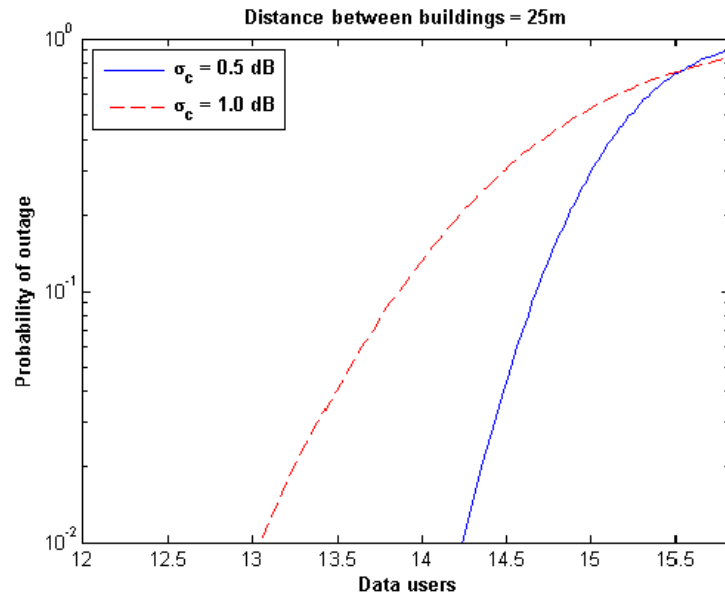


Fig. 13: Femtocell performance in the nine femtocells scenario for data users only (for three building with glass facet).

Table 1- Femtocell uplink capacity for data service as a function of the number of near data users within the macrocell around the femtocell.

Number of the near data users within the macrocell	Femtocell uplink capacity (data users)
0	14.53
1	14.46
4	14.26
12	13.72

Table 2- Femtocell uplink capacity for the voice service as a function of the number of near voice users within the macrocell around the femtocell.

Number of the near voice users within the macrocell	Femtocell uplink capacity (voice users)
0	61.93
1	61.76
4	61.26
12	59.90
36	55.85

*author's picture & biography

[Click here to download author's picture & biography: CV Bazil +Marta.doc](#)

Bazil Taha Ahmed was born in Mosul, Iraq, in 1960. He received the B. Sc. and M. Sc. degrees in Electronics and Telecommunication Engineering from the University of Mosul, in 1982 and 1985, respectively. He got the D.E.A and Ph. D degrees both in Telecommunication Engineering from the Polytechnic University of Madrid, in 2001 and 2003 respectively. Now he is working as an Associate Professor at the Universidad Autonoma de Madrid. He has published more than 90 scientific journal and conference papers in the area of the electromagnetic propagation and CDMA systems, particularly the CDMA capacity. His research interests include coexistence and wireless access technologies such as UMTS, WiMAX, Ultra Wideband systems and Personal Area Network (WPAN).



Marta Anaya de Paz was born in Madrid, Spain, in 1988. She is working toward the M. Sc. Degree in Telecommunication Engineering. Her research interests include coexistence and wireless access technologies such as UMTS, WiMAX and Personal Area Network (WPAN).



Presupuesto

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000 €
- Alquiler de impresora láser durante 12 meses 100 €
- Material de oficina 150 €
- Total de ejecución material..... 2.250 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material..... 360 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material..... 135 €

4) Honorarios Proyecto

- 900 horas a 20 € / hora 18000 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión 60 €
- Encuadernación 25 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 20835 €

7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto..... 3333,6 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto 24168,6 €

Madrid, Marzo de 2012

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Marta Anaya de Paz

Ingeniero Superior de Telecomunicación

Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio sobre la capacidad de sistemas femtocelda en distintos escenarios. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partidaalzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al

ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

