

Control de interferencias en redes heterogéneas LTE-A con despliegues de femtoceldas

Trabajo Fin de Máster

Autor: Miguel Eguizábal Alonso

Directora: Ángela Hernández Solana

Curso 2010-2011

Septiembre 2011

Máster y Doctorado en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



Universidad
Zaragoza

Control de interferencias en redes heterogéneas LTE-A con despliegues de femtoceldas

Resumen

Las nuevas tecnologías 802.16x, en particular el WiMAX Mobile (802.16e), IEEE 802.16j y 802.16m, el MBWA (IEEE 802.20x) y el LTE (Long Term Evolution) de 3GPP (3rd Generation Partnership Project) están cambiando profundamente el escenario actual de las comunicaciones celulares de banda ancha. En este ámbito de desarrollo global de los sistemas avanzados de banda ancha, la provisión de servicios multimedia se ve limitada particularmente en zonas urbanas con una alta densidad de tráfico y en entornos interiores. Por este motivo crece el interés por el despliegue de estaciones/nodos de acceso de baja potencia para mejorar la cobertura y capacidad, contemplándose distintas soluciones basadas en el despliegue de distintos tipos de nodos, que pueden ser relays, picoceldas y femtoceldas, los cuales operan bajo la cobertura de las macroceldas existentes. Este nuevo tipo de escenario generalmente recibe el nombre de red heterogénea. El presente trabajo fin de máster se ha centrado fundamentalmente en los despliegues heterogéneos basados en femtoceldas.

Las femtoceldas se caracterizan por un backhaul fijo, por su capacidad de autoconfiguración y autooptimización y por un despliegue no planificado. Estas características le confieren un gran potencial para mejorar el acceso de los usuarios a los servicios de las redes comerciales en los entornos residenciales, donde operando en las bandas licenciadas de los sistemas 4G, los móviles pueden acceder a las femtoceldas de forma compatible con el acceso a las macroceldas. La conveniencia de considerar soluciones femtocelda tiene también un elevado interés en despliegues corporativos y profesionales. Está claro que en despliegues estándar de la red, las configuraciones de red heterogéneas teóricamente incrementan la capacidad y eficiencia, ya que un número mayor de usuarios pueden potencialmente acceder al mismo conjunto de recursos frecuenciales y se pueden aplicar esquemas de modulación y codificación más altos. No obstante, la cobertura y servicio de femtoceldas se pueden ver severamente condicionados y degradados cuando se despliegan bajo la cobertura de macroceldas, si no se aplican procedimientos de gestión de recursos e interferencia adecuados.

Este trabajo fin de máster se centra en estudiar, desarrollar y evaluar estrategias de gestión de recursos para garantizar la coexistencia y mejora de capacidad en escenarios heterogéneos con despliegues de femtoceldas. En primer lugar se ha realizado un estudio teórico del estado del arte, para analizar las estrategias de control de interferencias propuestas en la literatura. Posteriormente, para desarrollar y evaluar las estrategias propuestas se ha empleado una plataforma de simulación propietaria sobre la que se han realizado las modificaciones e implementaciones necesarias para permitir los despliegues heterogéneos. Se han propuesto esquemas de coordinación de interferencias para diferentes despliegues heterogéneos y se han evaluado mediante simulaciones en varios escenarios.

Índice

1. Contexto y objetivos del trabajo	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problemática de la gestión de interferencias.....	3
1.2.1 Problemática en entornos macrocelulares.....	3
1.2.2 Problemática de las femtoceldas OFDMA	6
1.3 Objetivos del trabajo.....	9
1.4 Documentación del trabajo.....	9
2. Descripción del sistema	11
2.1 Despliegue, parámetros y modelado de nivel físico y enlace	11
2.1.1 Despliegue celular.....	11
2.1.2 Entramado de la comunicación, recursos asignables y formatos de transporte.....	12
2.1.3. Modelado del nivel físico y enlace.....	14
2.1.4 Modelado del canal radio y características de transmisión y recepción	15
2.1.5 Modelado de los procedimientos de monitorización del canal.....	18
2.2 Modelado de conexiones y procesos ARQ.....	19
2.2.1 Modelo de fuente de tráfico.....	19
2.3 Esquemas de gestión de recursos	20
2.3.1 Principios básicos de los esquemas de coordinación	21
2.3.2 Algoritmos de scheduling temporal.....	26
2.3.3 Descripción detallada de los algoritmos de scheduling frecuencial	27
3. Propuestas de asignación de recursos en despliegues heterogéneos	31
3.1 Planteamiento inicial.....	31
3.2 Descripción de la red heterogénea	32
3.2.1 Despliegue de las femtoceldas	32
3.2.2 Modelado explícito de la interferencia.....	34
3.2.3 Características de transmisión/recepción de las femtoceldas y los terminales móviles	34
3.2.4 Esquemas de gestión de recursos.....	35
3.3 Despliegue de una femtocelda en cada macrocelda	37
3.3.1 Esquema de coordinación 1.....	38
3.3.2 Esquema de coordinación 2.....	38
3.3.3 Esquema de coordinación 3.....	38
3.3.4 Esquema de coordinación 4.....	39
3.3.5 Esquema de coordinación 5.....	39
3.3.6 Esquema de coordinación 6.....	39
3.3.7 Esquema de coordinación 7.....	39

3.4 Despliegue de una rejilla 3x3	40
3.4.1 Esquemas sin coordinación entre femtoceldas	41
3.4.2 Esquemas con coordinación entre femtoceldas.....	41
4. Resultados.....	47
4.1 Despliegue de una femtocelda en cada macrocelda	47
4.2 Despliegue de una rejilla 3x3	60
5. Conclusiones y líneas futuras	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Líneas futuras	72
6. Referencias Bibliográficas.....	73
ANEXO A: Revisión del estado del arte.....	75

Figuras

Figura 1. Espectro de la señal OFDM.....	1
Figura 2. Sectorización frecuencial.....	4
Figura 3. Partial FFR.....	5
Figura 4. Soft FFR.....	5
Figura 5. FFR con sectorización en la subbanda exterior	5
Figura 6. Ejemplo de la técnica de “wrap-around”	11
Figura 7. División del área de cobertura de la celda por zonas.....	12
Figura 8. Multiplexación de las señales de control y datos.....	13
Figura 9. Transmisión explícita de interferencias (en líneas discontinuas).....	15
Figura 10. Patrón de radiación de la antena de las estaciones base.....	18
Figura 11. Asignación ordenada de RBs en la subbanda interior.....	24
Figura 12. Asignación de recursos del esquema FFRopa	25
Figura 13. Asignación adaptativa de potencia	26
Figura 14. Ejemplo del despliegue de una femtocelda en cada macrocelda	32
Figura 15. Distribución de la rejilla 3x3	33
Figura 16. Posiciones de las femtoceldas.....	38
Figura 17. Esquemas de coordinación propuestos para las femtoceldas	40
Figura 18. Distribución frecuencial del esquema de coordinación 11	42
Figura 19. Distribución de los RBs prioritarios en el esquema de coordinación 14	44
Figura 20. Distribución de los RBs exteriores en el esquema de coordinación 15.....	45
Figura 21. Distribución de los RBs prioritarios del esquema de coordinación 16.....	46
Figura 22. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior	49
Figura 23. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación del sector	50
Figura 24. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores	51
Figura 25. Barrido de Potencia. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior	51
Figura 26. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior	52
Figura 27. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación del sector	53
Figura 28. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores	54
Figura 29. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior	55
Figura 30. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación del sector	56
Figura 31. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores	57
Figura 32. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior	57
Figura 33. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación	58
Figura 34. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores	59
Figura 35. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior	60

Figura 36. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación	61
Figura 37. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores	62
Figura 38. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior	62
Figura 39. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación	63
Figura 40. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores	63
Figura 41. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior	66
Figura 42. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación	66
Figura 43. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores	67
Figura 44. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior	68
Figura 45. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación	69
Figura 46. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores	69
Figura A1. Escenarios de interferencia para el DL.....	78
Figura A2. Escenarios de interferencia para el UL.....	79
Figura A3. Clasificación de técnicas de asignación de recursos radio.....	80
Figura A4. División frecuencial del ancho de banda del sistema	86
Figura A5. División del ancho de banda del sistema	88
Figura A6. Distribución del ancho de banda en el sector 1 de la macrocelda	89
Figura A7. Distribución frecuencial en un esquema FFR.....	91
Figura A8. Esquema de coordinación de interferencias propuesto	92
Figura A9. Esquema de coordinación de interferencias propuesto basado en FFR.....	93
Figura A10. Diagrama de flujo del esquema FFR propuesto	94
Figura A11. Ejemplos de selección de subcanales	96
Figura A12. Escenario de simulación propuesto	97

Tablas

Tabla 1. Parámetros de simulación	14
Tabla 2. Características de los formatos de transporte	14
Tabla 3. Modelos de propagación multicamino.....	17
Tabla 4. Parámetros de simulación del despliegue femtocelular	34

Abreviaturas y Acrónimos

3GPP	↔	3rd Generation Partnership Project
AWGN	↔	Additive White Gaussian Noise
BLER	↔	Block Error Rate
CCI	↔	Co-Channel Interference
CINR	↔	Channel to Interference and Noise Ratio
CQI	↔	Channel Quality Indicator
DFR	↔	Dynamic Frequency Reuse
DL	↔	Downlink
E-UTRA	↔	Enhanced Universal Terrestrial Radio Access
FD	↔	Frequency domain
FDD	↔	Frequency Duplex Division
FFR	↔	Fractional Frequency Reuse
FFRopa	↔	FFR with frequency occupation ordering and power adaptation
FIFO	↔	First Input First Output
ICI	↔	Inter Cell Interference
ICIC	↔	Inter Cell Interference Coordination
ISD	↔	Inter-Site Distance
LTE	↔	Long Term Evolution
LTE-A	↔	LTE Advanced
MCS	↔	Modulation and Coding Scheme
OFDMA	↔	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCI	↔	Physical Cell Identity
PTP	↔	Precision Timing Protocol
QoS	↔	Quality of Service
RB	↔	Resource Block

RSRP	↔	Reference Signal Received Power
SG	↔	Starting Group
SINR	↔	Signal to Interference and Noise Ratio
SON	↔	Self Organizing Networks
TD	↔	Time Domain
TTI	↔	Transmission Time Interval
TU	↔	Transport Unit
UE	↔	User Equipment
UL	↔	Uplink
WiMAX	↔	Worldwide Interoperability for Microwave Access

1. Contexto y objetivos del trabajo

1.1 Introducción

El aumento en los últimos años del número de aplicaciones multimedia inalámbricas requiere comunicaciones fiables y de alta velocidad sobre el canal radio. En este contexto, OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) se ha situado como la tecnología más importante y prometedora para sistemas celulares móviles de banda ancha de próxima generación, como es el caso de LTE (Long Term Evolution) o WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). OFDMA permite el reparto de recursos radio en dos dimensiones (tiempo y frecuencia). Entre las principales características de OFDMA se pueden destacar la alta inmunidad a la propagación multicamino, la eficiencia espectral y la escalabilidad del ancho de banda. De hecho, desde el punto de vista de la gestión de recursos radio, una de las principales características es la flexibilidad en la asignación de recursos, es decir, la flexibilidad en la cantidad de recursos que pueden asignarse a cada usuario, lo que se traduce en el soporte de multitud de tipos de tráfico y calidades de servicio diferentes.

En rasgos generales, el ancho de banda total del sistema (BW) se divide en N_{FFT} subportadoras OFDM ortogonales, separadas entre sí Δf Hz. De todas estas subportadoras, sólo N_{used} transmiten potencia, dejando subportadoras libres a ambos lados del ancho de banda (bandas de guarda) para limitar las interferencias en canales adyacentes. Además, parte de las subportadoras se usan para transmitir señales piloto que permiten realizar la estimación de canal en recepción. Con todo esto, el espectro de una señal OFDM puede esquematizarse como el mostrado en la Figura 1.

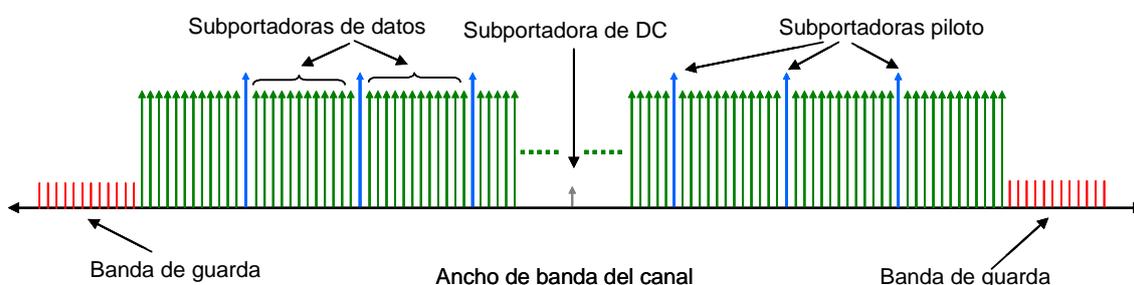


Figura 1. Espectro de la señal OFDM

A partir de la unidad temporal más básica, el símbolo OFDM, en este tipo de redes se define una estructura de transmisión temporal jerárquica, que si por ejemplo tomamos como referencia la propuesta por el 3GPP para LTE, está formada por tramas de duración 10ms, cada una de las cuales está compuesta por 10 subtramas de 1ms. A su vez, cada subtrama se divide en 2 slots de 7 o 6 símbolos OFDM. La trama determina la periodicidad del envío de los parámetros que permanecen estables en el sistema, mientras que la subtrama (1ms) determina la periodicidad con la que en LTE se actualizan las decisiones de scheduling de recursos frecuenciales y temporales (TTI: Transmission Time Interval). Al considerar OFDMA como técnica de acceso, en un instante determinado es posible transmitir simultáneamente información hacia o desde varios usuarios de la celda, multiplexando dicha información en distintos recursos frecuenciales (subportadoras OFDM) y temporales, asignados a los usuarios

de manera ortogonal, de forma que un usuario recibe en cada asignación un conjunto de recursos frecuenciales durante un conjunto de símbolos. Idealmente, el mecanismo de acceso OFDMA permitiría realizar cualquier reparto de subportadoras entre usuarios y con la granularidad deseada. Sin embargo, este acceso requiere de una cantidad de señalización desmesurada para cubrir cualquier posibilidad. Por ello, se suele apostar por definir bloques de recursos radio (RB: Resource Block). El RB está compuesto de N_{sc} subportadoras durante N_s símbolos OFDM consecutivos de una subtrama. Un RB es la unidad mínima de asignación en el sistema, es decir, que un usuario no puede recibir menos subportadoras que las $[N_{sc} \times N_s]$ que componen un RB.

En definitiva, la estructura MAC está diseñada para favorecer un scheduling rápido de paquetes en tiempo y frecuencia, capaz de sacar beneficio del conocimiento del estado de las condiciones de canal y de adaptarse a las características del tráfico, favoreciendo la provisión de QoS (Quality of Service) en modo conmutación de paquete, incluyendo servicios con requisitos muy estrictos de QoS en términos de retardo. Sin embargo, el comportamiento de los sistemas OFDMA depende fuertemente de los algoritmos de asignación de recursos, siendo los principales aspectos de diseño de estos algoritmos la eficiencia espectral, la garantía de QoS y el reparto equitativo entre los usuarios. Dentro de cada celda, el scheduling ortogonal de recursos a los distintos usuarios evita la interferencia intracelular, pero para poder maximizar el uso del espectro disponible en despliegues multicelulares, el objetivo de la mayoría de los sistemas 4G es realizar un despliegue de una única frecuencia. Esto es, todas las celdas comparten el mismo ancho de banda. Un despliegue con un factor de reuso frecuencial igual a la unidad supone un aumento potencial de capacidad debido a la disponibilidad de un mayor ancho de banda, aunque provoca fuertes interferencias inter-celulares (ICI: Inter Cell Interference), que deben ser gestionadas para no comprometer la ganancia efectiva.

La ICI degrada severamente el rendimiento de los usuarios, especialmente el de los usuarios situados en los bordes de las celdas, debido a los bajos niveles de relación señal a ruido más interferencia (SINR: Signal to Interference and Noise Ratio), lo que generalmente limita la tasa de datos obtenible y define el esquema de codificación y modulación (MCS: Modulation and Coding Scheme) a emplear. Todo esto justifica la necesidad de aplicar mecanismos de control de interferencias que mitiguen su efecto y permitan establecer comunicaciones fiables en los límites de las celdas. Son muchos los esfuerzos de investigación efectuados en esta línea para elevar la capacidad real de los despliegues macrocelulares en los sistemas 4G, si bien queda claro que la accesibilidad y provisión, eficiente y de calidad, de los servicios multimedia demandados se ve particularmente limitados en zonas urbanas con alta densidad de tráfico, en particular en escenarios con una alta concentración de usuarios peatones con servicios de alta demanda de tasa y calidad, y en el interior de edificios. Por ello, crece el interés en la industria y en los investigadores involucrados en el desarrollo de estos estándares, y en particular en el 3GPP, dentro del marco de LTE-A (LTE Advanced), por el despliegue de estaciones/nodos de acceso de baja potencia para mejorar la cobertura y capacidad, contemplándose distintas soluciones basadas en el despliegue de distintos tipos de relays, picoceldas y femtoceldas que operan bajo la cobertura de las habituales macroceldas. Es habitual referirse a este nuevo escenario, como red heterogénea.

Este trabajo se enmarca precisamente en este escenario heterogéneo, centrándose en los despliegues basados en femtoceldas. Atendiendo al objetivo de maximizar la utilización de los recursos frecuenciales, femtoceldas y macroceldas comporten los mismos recursos frecuenciales. En este contexto, la coexistencia de macro y femtoceldas pasa por el diseño efectivo de procedimientos de control de la potencia y de coordinación y mitigación de interferencias. Es precisamente en este punto donde se centra el trabajo fin de master.

A continuación, en los puntos 1.2.1 y 1.2.2 se introduce brevemente la problemática de la gestión de la interferencia en entornos macrocelulares y femtocelulares respectivamente en redes LTE, si bien en el ANEXO A, se presenta una revisión del estado del arte más extendida y completa que ayuda a situar de forma más clara las propuestas que se describen y analizan en los siguientes capítulos.

1.2 Problemática de la gestión de interferencias

1.2.1 Problemática en entornos macrocelulares

Los mecanismos de control de interferencias pueden clasificarse en tres grandes grupos: mitigación de interferencias, cancelación de interferencias y coordinación de interferencias. Cada una de estas opciones presenta ciertas restricciones que condicionan la asignación posterior de los recursos radio a los distintos usuarios. De hecho, la interrelación entre el mecanismo de control de la ICI y los algoritmos de scheduling es tan fuerte que es preciso analizar también si las restricciones debidas al primero no limitan de forma exagerada la accesibilidad a los recursos. Así, un mecanismo que consiga proporcionar unas condiciones de interferencia muy buenas a costa de imponer un gran número de restricciones en el acceso a los recursos, y por tanto limitando la libertad de asignación del scheduler, puede acabar siendo contraproducente en términos de bloqueo de usuarios. Por lo tanto existe un compromiso permanente entre la reducción de la ICI y la accesibilidad de los recursos.

Debido a que los mecanismos de mitigación de interferencias aportan una ganancia reducida y a que las técnicas de cancelación de interferencias son costosas computacionalmente, en este trabajo nos centraremos en métodos de coordinación de interferencias. Los métodos de coordinación de interferencias se basan en la aplicación de restricciones en la asignación de recursos a determinados usuarios de forma coordinada a lo largo de la red, de modo que se reduzcan las interferencias sufridas por los UEs (User Equipment), y especialmente de aquellos situados en el límite de la celda (o del sector). Tales restricciones, que generalmente se refieren a los recursos tiempo-frecuencia asignables y a la potencia de transmisión permitida, limitarán la libertad de asignación de los algoritmos de scheduling, con lo que es esperable una reducción en el throughput medio de la celda pero un aumento significativo en el throughput de los UEs situados en el exterior de la misma.

Existen varios esquemas de coordinación de ICI (ICIC: Inter Cell Interference Coordination) para redes móviles OFDMA que están ampliamente aceptados, como puede ser el reuso frecuencial fraccional (FFR: Fractional Frequency Reuse) y que mejoran la primera aproximación potencial al problema, la sectorización frecuencial. La sectorización frecuencial consiste en dividir el ancho de banda disponible en tantas subbandas como sectores tiene la celda y cada sector asigna exclusivamente los recursos de una de estas subbandas. La situación

más común es que cada celda tenga tres sectores y entonces el reparto de recursos frecuenciales entre los diferentes sectores queda como aparece en la Figura 2. El principal problema de este esquema es la falta de flexibilidad para adaptarse a situaciones de distribución heterogénea de carga entre sectores.

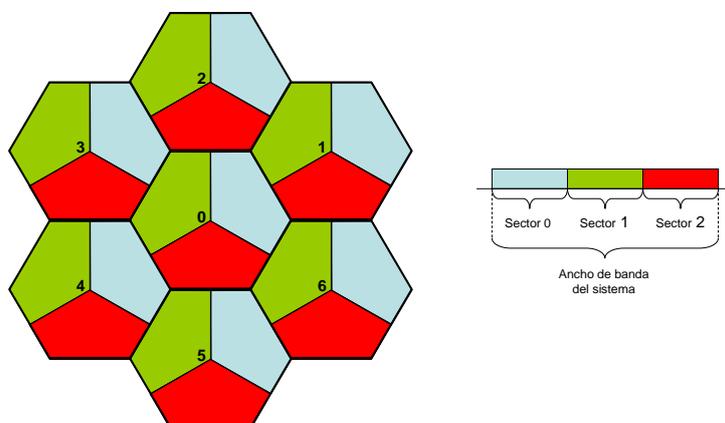


Figura 2. Sectorización frecuencial

FFR es una técnica de coordinación de interferencias que ha ganado gran relevancia en los últimos años en el contexto de redes celulares basadas en OFDMA. El principio básico del esquema FFR es dividir el ancho de banda del sistema en dos zonas, una zona para los usuarios situados en el interior de la celda y otra para los situados en el exterior. Las celdas adyacentes emplean diferentes subbandas para los usuarios situados en su zona exterior, reduciendo así el nivel de ICI en esa zona. En los recursos de la subbanda reservada para la parte exterior se aumenta el nivel de potencia transmitida para alcanzar los límites de cobertura de la celda. Existen en realidad diversas variantes de implementación basadas en este principio. En la Figura 3 puede observarse el reparto de recursos para el esquema denominado Partial FFR. En este caso, los usuarios del interior de la celda utilizan la misma subbanda frecuencial en todas las celdas, mientras que la subbanda exterior se divide en tres subbandas, de forma que cada celda utiliza una subbanda ortogonal a sus vecinas, creando una estructura de cluster de tamaño 3. Por tanto, se aplica reuso 1 en el interior de la celda y reuso 3 en el exterior. En este caso, el interior de la celda no comparte recursos con el exterior de las celdas vecinas, lo que reduce la interferencia. Sin embargo, la eficiencia en la utilización de recursos queda limitada. Para aumentar la flexibilidad y eficiencia, en el esquema Soft FFR ilustrado en la Figura 4, todo el ancho de banda es accesible en cada una de las celdas gracias al ajuste de potencia. Como en el Partial FFR, en el exterior de las celdas se usan subbandas ortogonales, pero ahora en el interior de la celda si está permitido transmitir sobre los recursos frecuenciales reservados para el exterior de las celdas vecinas, solo que con un nivel de potencia menor, para reducir la interferencia ocasionada sobre éstas. Soft FFR busca una mayor eficiencia espectral pero implica una mayor ICI. Es importante resaltar que en el caso de Partial FFR no es estrictamente necesario definir diferentes niveles de potencia, aunque es deseable para mejorar la calidad con la que llega la señal al exterior de la celda. Por otra parte, en ambos casos se puede mejorar la eficiencia de los esquemas ajustando tanto el ratio entre los niveles de potencia entre las subbandas exterior e interior como el tamaño de las subbandas, de forma dinámica o semiestática para adaptarse a cambios en la distribución de tráfico dentro de la celda.

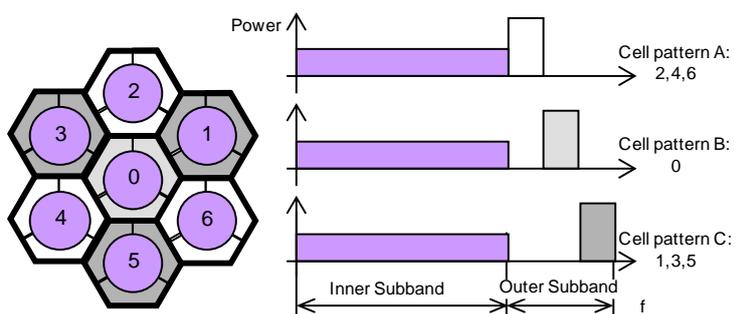


Figura 3. Partial FFR

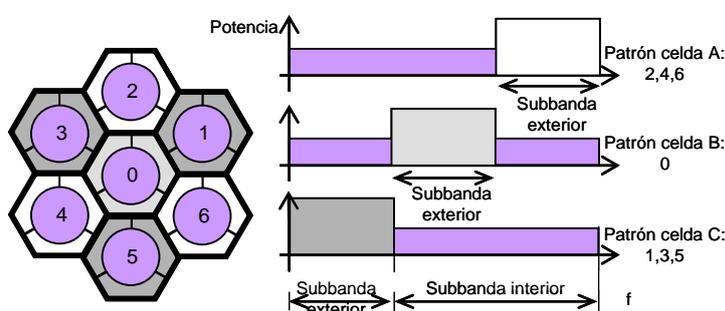


Figura 4. Soft FFR

Partiendo de estos esquemas se pueden encontrar múltiples variantes. Por ejemplo, si combinamos la sectorización frecuencial con el esquema de reuso frecuencial fraccional podemos mejorar la calidad de la señal en el exterior de la celda respecto a los esquemas FFR mostrados en la Figura 3 y la Figura 4, ya que disminuimos la ICI de las células adyacentes. Como hemos comentado, en situaciones prácticas lo más común es el despliegue de una red tri-sectorizada, que combinado con el esquema FFR obtendríamos el esquema mostrado en la Figura 5. En este tipo de esquemas la subbanda reservada para la parte exterior es normalmente $1/3$ del ancho de banda total.

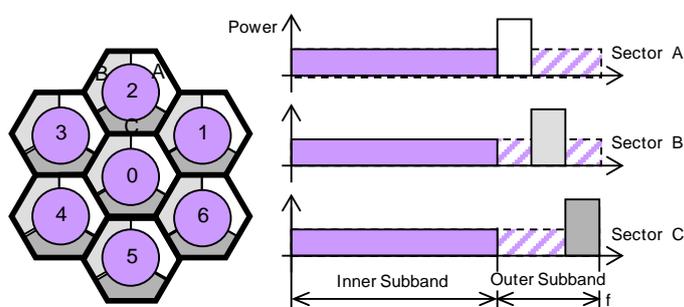


Figura 5. FFR con sectorización en la subbanda exterior

Potencialmente, la tri-sectorización puede multiplicar por tres la capacidad en el interior de la celda ya que los recursos frecuenciales podrían asignarse una vez en cada sector. Sin embargo, la interferencia inter-sector impide un reuso frecuencial tan efectivo, ya que los requisitos de SINR no pueden satisfacerse siempre. Esta es la razón por la cual en las implementaciones prácticas de ICIC, aunque todos los recursos radio son accesibles en cada sector, no se asigna la misma subportadora simultáneamente en dos sectores adyacentes pertenecientes a la misma celda.

Recientes estudios [2], indican que en los próximos años el 50% de las llamadas telefónicas y el 70% de los servicios de datos se llevarán a cabo en entornos interiores. Por lo tanto, los operadores necesitarán proporcionar altas tasas de datos y garantizar buenas calidades de servicio (QoS) en entornos interiores. Lograr servir estas demandas de servicios en interiores, mediante la cobertura que ofrecen las macroceldas es una propuesta muy cara, por eso se requieren nuevas soluciones para el problema de cobertura en interiores. Entre las diferentes soluciones propuestas cabe destacar los ya referidos despliegues de redes heterogéneas, que consisten en desplegar nodos de baja potencia sobre la cobertura de las macroceldas ya existentes. Estos nodos de baja potencia pueden ser relays, picoceldas o femtoceldas, centrándose este trabajo en el despliegue de femtoceldas sobre redes macrocelulares.

1.2.2 Problemática de las femtoceldas OFDMA

Las femtoceldas son estaciones base de baja potencia, que cubren radios de cobertura de varias decenas de metros y que son instaladas típicamente en casas o en oficinas. Pueden trabajar bajo diferentes estándares de redes celulares, como GSM, UMTS, WiMAX o LTE, de forma totalmente transparente para los usuarios. Un aspecto importante de las femtoceldas es que su enlace backhaul (enlace que conecta la femtocelda con la infraestructura de red móvil) es un enlace de banda ancha cableado, como puede ser una fibra óptica o una línea ADSL, disponible normalmente en los hogares. A través del enlace backhaul la femtocelda puede intercambiar información con otras femtoceldas o con las macroceldas.

En los despliegues de femtoceldas se deben considerar y afrontar numerosas cuestiones antes de poder garantizar la interoperabilidad con las macroceldas existentes. Entre ellas hay que resaltar el método de acceso y la gestión de la interferencia. En cuanto al método de acceso, las femtoceldas pueden configurarse de tres formas:

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

Una femtocelda no solo proporciona cobertura dentro de la casa del propietario o dentro de la oficina, sino que también radia hacia el exterior, así como a casas vecinas, introduciendo interferencia. Debido a esto y a que las femtoceldas se despliegan dentro del área de cobertura de macroceldas existentes, pueden causar una fuerte degradación de las prestaciones de los usuarios conectados a las macroceldas, particularmente en el enlace descendente cuando estos se encuentran próximos a la femtocelda. Por otra parte, las

transmisiones en el enlace ascendente de los usuarios macrocelulares próximos, pueden degradar la comunicación de la femtocelda. Además, el despliegue de nuevas femtoceldas puede alterar el funcionamiento de las femtoceldas ya existentes. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que en sistemas OFDMA, la interferencia solo ocurre cuando agresor y víctima utilizan los mismos subcanales.

Así, de forma genérica a la hora de analizar el problema se suelen considerar dos capas separadas (la capa de las femtoceldas y la de las macroceldas) dentro de la red, permitiendo clasificar las interferencias de la siguiente forma:

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

El presente trabajo fin de máster se centra en despliegues de femtoceldas que utilizan los mismos recursos frecuenciales que las macroceldas sobre las que se despliegan, para lograr así maximizar la eficiencia espectral. Por lo tanto, las femtoceldas van a introducir interferencia sobre las macroceldas existentes y viceversa (interferencia cross-layer). Además las femtoceldas también se introducirán interferencia entre ellas, si están desplegadas en zonas próximas (interferencia co-layer). Bajo este escenario es necesaria la utilización de esquemas de asignación de recursos y de control de interferencia eficientes, para tratar de mitigar la degradación.

El método de acceso (abierto, cerrado o híbrido) facilitará o dificultará la gestión de la coexistencia. En general, en soluciones residenciales es habitual pensar que el acceso solo esté permitido al usuario de la instalación (acceso cerrado), aunque en ese caso los usuarios que no pueden acceder a la femtocelda ocasionan o reciben un elevado nivel de interferencia. Para combatir este efecto, resulta más deseable plantear un acceso abierto, si bien ante lógica reticencia de los propietarios de las instalaciones lo más lógico es derivar hacia esquemas de acceso híbrido.

En la revisión del estado del arte realizada en el ANEXO A, puede observarse que existen diferentes estrategias de asignación de recursos radio para minimizar la interferencia en despliegues heterogéneos. Una posible clasificación de las diferentes estrategias es la siguiente:

- Asignación centralizada: Es un nodo central el encargado de distribuir los recursos entre la macrocelda y las femtoceldas que están desplegadas en ella. Una vez realizada la asignación de recursos, el nodo central tendrá que distribuir esta información a la macrocelda y a las femtoceldas.
- Asignación distribuida cooperativa: Son las propias femtoceldas las encargadas de escoger en qué recursos asignar a sus usuarios. Como es cooperativa, las femtoceldas se intercambian información con las femtoceldas vecinas (por ejemplo: recursos

frecuenciales que van a emplear, potencia de transmisión, etc.) y tienen en cuenta dicha información para planificar los recursos que emplean.

- **Asignación distribuida no cooperativa:** Son las propias femtoceldas las encargadas de escoger en qué recursos asignar a sus usuarios, sin recopilar información acerca de las femtoceldas vecinas. Es necesario que las femtoceldas sean autónomas, desde el punto de vista de que tienen que ser capaces de estimar cuales son los mejores recursos sobre los que asignar a sus usuarios.

Según el escenario concreto será más ventajoso emplear un tipo de esquema frente a otros. Si las femtoceldas van a ser desplegadas por los propios usuarios en domicilios u oficinas, es más beneficioso pensar en esquemas distribuidos que en esquemas centralizados. Que el esquema sea cooperativo o no cooperativo dependerá de factores como el hecho de que la red sea capaz de soportar ese aumento de señalización, o que exista algún mecanismo de comunicación que dé soporte al intercambio de información entre las femtoceldas vecinas.

En cuanto a esquemas distribuidos cooperativos, por ejemplo en [4] proponen dividir el ancho de banda del sistema en tres subbandas, de tal forma que cada sector de la macrocelda emplea una subbanda y las femtoceldas emplean las dos subbandas que no son utilizadas en el sector en el que están desplegadas. Y en [14] proponen un esquema de coordinación cognitivo que se basa en que las femtoceldas escogen inteligentemente los recursos frecuenciales a utilizar empleando información sobre las pérdidas de propagación medidas por las femtoceldas vecinas.

Para el caso de esquemas distribuidos no cooperativos en [5], [9] y [15] proponen emplear FFR (con alguna adaptación para el caso propuesto en [9]) como esquema de coordinación en las macroceldas y que las femtoceldas empleen las subbandas frecuenciales que no son empleadas en la zona de la macrocelda donde están desplegadas. En [6] y [7] analizan un esquema de asignación aleatorio, basado en que las femtoceldas escojan aleatoriamente en cada asignación los recursos frecuenciales que van a utilizar.

Si por el contrario las femtoceldas son desplegadas por el operador, lo más rentable sería pensar en esquemas centralizados, donde es un nodo central el que toma las decisiones de asignación de recursos y luego las transmite a las femtoceldas para que las apliquen. En [3] proponen un esquema en el que el nodo central decide encender algunas femtoceldas si se producen concentraciones de tráfico en los bordes de la macrocelda o por el contrario decide apagar algunas femtoceldas si desaparecen las concentraciones de tráfico. En [13] exponen un algoritmo para formar clústeres de femtoceldas, de tal forma que si una femtocelda está a mayor distancia que un umbral de otra femtocelda, puede pertenecer al mismo clúster, teniendo en cuenta que en un mismo clúster se emplean los mismos recursos frecuenciales. Existe un nodo central que es el encargado de crear los clústeres y asignar los recursos frecuenciales que debe emplear cada clúster.

Junto con el esquema de asignación de recursos también juega un papel fundamental el control de potencia. En el ANEXO A pueden verse varias estrategias de control de potencia, entre las que cabe destacar la propuesta en [4] que se basa en el empleo de máscaras de potencia con una potencia de transmisión mayor para los recursos empleados en la zona

exterior y una potencia menor para los recursos empleados en la zona interior y con un mayor reuso. Esta propuesta destaca por su sencillez, ya que otras propuestas de la literatura como las expuestas en [10] y [12] requieren algoritmos bastante complejos y costosos computacionalmente.

1.3 Objetivos del trabajo

El presente trabajo fin de máster se centra en el ámbito de la gestión de recursos radio y el control de la interferencia en redes heterogéneas con despliegues de femtoceldas.

El principal objetivo de este trabajo fin de máster es estudiar, desarrollar y evaluar estrategias de gestión de recursos a nivel de enlace y los ajustes de los procedimientos de nivel físico y enlace que les dan soporte. Este objetivo, centrado en el enlace descendente, y en el modo de duplexado FDD (Frequency Duplex Division), conlleva como subobjetivos:

- Análisis de la interferencia. Estudio y propuesta de procedimientos de control de la potencia y de coordinación de interferencias (particularmente cuando las femtoceldas comparten los recursos frecuenciales con las macroceldas). Se contempla el caso en el que las femtoceldas son desplegadas por los usuarios, de tal forma que los esquemas que se van a proponer y a analizar serán distribuidos, ya que parece ser que es el escenario que más se va a dar en los próximos años.
- Estudiar, proponer y evaluar de forma conjunta las estrategias de scheduling temporal y frecuencial, control de potencia, tasa y gestión de interferencias para cada despliegue. Para la evaluación de las propuestas se llevarán a cabo simulaciones en diferentes escenarios y situaciones.

1.4 Documentación del trabajo

En este punto se realiza un breve resumen de la documentación presentada en este Trabajo Fin de Máster (TFM). Esta documentación está compuesta de una memoria y un anexo.

- **Memoria:** En este documento se explica resumidamente la problemática de las redes heterogéneas, se describe el sistema celular utilizado para las simulaciones, se explican los esquemas de coordinación de interferencias propuestos y por último se muestran los resultados y las conclusiones del trabajo. A continuación se resumen los principales puntos de la memoria:
 - Contexto y objetivos del trabajo: En este punto se ha realizado una introducción sobre la tecnología OFDMA y sobre la problemática derivada del despliegue de redes heterogéneas. Además se ha realizado una breve descripción del trabajo y se han marcan los objetivos del mismo.
 - Descripción del sistema: Aquí se han analizado y descrito las principales características del nivel físico, procedimientos de nivel de enlace y de las estrategias de gestión de recursos implementadas en el sistema macrocelular, sobre el que se llevará a cabo el despliegue. La descripción de estas estrategias es indispensable, ya que las propuestas efectuadas deben coordinarse e integrarse en

ellas. Además, la descripción sirve para introducir los parámetros de configuración comunes, utilizados en la evaluación de las propuestas

- Propuestas de asignación de recursos en despliegues heterogéneos: En este apartado se describen los esquemas de coordinación de interferencias propuestos en el trabajo para los despliegues heterogéneos.
- Resultados: En este punto se muestran y analizan los resultados obtenidos mediante simulaciones.
- Conclusiones y líneas futuras: Aquí se exponen las principales conclusiones, así como posibles mejoras futuras del trabajo.
- Referencias bibliográficas: En este apartado se enumeran los diferentes libros o artículos que se han utilizado como referencia para la realización de este trabajo.
- **ANEXO A: Revisión del estado del arte:** En este anexo se realiza una revisión más detallada del estado del arte de los trabajos de investigación que están actualmente en marcha relacionados con la gestión de interferencias y control de potencia en despliegues heterogéneos con femtoceldas.

2. Descripción del sistema

En este apartado se va a realizar una breve descripción del sistema macrocelular sobre el que se integran las propuestas de despliegue heterogéneo. La descripción abarca los aspectos más representativos relativos a las características y modelado del nivel físico, procedimientos de nivel de enlace y estrategias de gestión de recursos (incluidos los procedimientos de coordinación de interferencias) contemplados en la plataforma de simulación C++ propietaria, en la que se integrarán y evaluarán las distintas propuestas. Como se ha comentado, el estudio se centra en el enlace descendente (DL). Se asume que el duplexado es FDD, lo que permite modelar de forma detallada el enlace descendente y de forma muy simplificada pero realista el ascendente.

2.1 Despliegue, parámetros y modelado de nivel físico y enlace

2.1.1 Despliegue celular

La plataforma de simulación asume un despliegue celular con celdas hexagonales trisectorizadas. Para las simulaciones realizadas en este trabajo se ha escogido un despliegue con 19 celdas. La plataforma aplica la técnica de “wrap-around”, que permite emular el efecto de una red celular de grandes dimensiones a través de un conjunto reducido de celdas. Esta técnica se basa en replicar virtualmente el clúster de N celdas (en nuestra plataforma, $N=19$) de forma circular, de tal forma que las celdas que en el clúster original están situadas en extremos opuestos y por lo tanto, incorreladas por distancia, se consideran ahora celdas vecinas interfiriéndose las unas a las otras. En la Figura 6 puede verse el ejemplo de aplicar esta técnica.

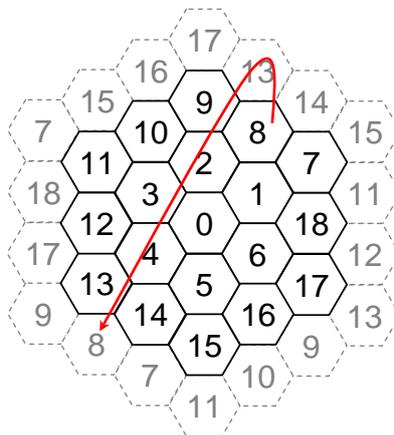


Figura 6. Ejemplo de la técnica de “wrap-around”

La distancia entre estaciones base, la cual delimita el radio de cobertura de la celda se denomina ISD (Inter-Site Distance) y es un parámetro configurable en la plataforma de simulación. En concreto, las simulaciones de este trabajo se han llevado a cabo con una ISD de 1732m. Respecto al despliegue de los sectores de la celda, la plataforma permite configurar la dirección de máxima radiación de la antena del sector, considerándose que está dirección se corresponde con el centro de la zona de cobertura del sector. Las simulaciones se han

realizado fijando la dirección de máxima radiación con un ángulo de 30° respecto al eje horizontal.

En lo que se refiere a la carga del sistema, la plataforma de simulación permite diferentes configuraciones. Para poder distribuir la carga de forma heterogénea se ha dividido la superficie de la celda en tres zonas geográficas con la misma superficie tal y como se muestra en la Figura 7. En las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo se han distribuido los usuarios de forma homogénea, de tal forma que cada zona de cada sector de cada celda contiene el mismo número de usuarios.

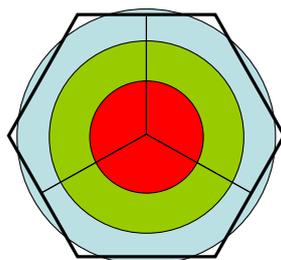


Figura 7. División del área de cobertura de la celda por zonas

Debido a que los usuarios no están estáticos, sino que se mueven a medida que avanza la simulación, concretamente a 3Km/h , las condiciones de carga del sistema pueden modificarse. Sin embargo la plataforma permite limitar el movimiento de los usuarios. En concreto, en las simulaciones realizadas se ha limitado el movimiento de los usuarios entre zonas y sectores, de tal forma que durante la simulación los usuarios no pueden cambiar ni de zona ni de sector, manteniéndose constantes las condiciones de carga.

2.1.2 Entramado de la comunicación, recursos asignables y formatos de transporte

La capa física implementada en la plataforma de simulación se basa en OFDMA. En el punto 1.1 y en el ANEXO A ya se han comentado las principales características de OFDMA y las razones por las que se está apostando por esta tecnología.

En relación con el entramado se ha considerado como base de partida la temporización de E-UTRA (Enhanced Universal Terrestrial Radio Access). Las tramas están definidas con una duración de 10 ms , y a su vez están formadas por 10 subtramas. Las subtramas, con una duración de 1ms , constituyen la unidad mínima de transmisión con sentido en sí misma y cada una de estas subtramas se divide en 2 slots. Tomando como referencia los parámetros físicos de LTE y considerando emplear el prefijo cíclico normal y una separación entre subportadoras de $\Delta f=15\text{Hz}$, cada slot está formado por 7 símbolos OFDM.

Señalización y control están multiplexados en tiempo a nivel de subtrama, no obstante, en la plataforma no se transmite de forma explícita el canal de control, de tal forma que se asume que los usuarios conocen de forma inmediata y sin errores las asignaciones de recursos realizadas en el canal de control. Sólo se tiene en cuenta que existen determinados recursos que estarían ocupados por el canal de control y que por lo tanto no pueden emplearse para la transmisión de datos. En cuanto a lo que respecta a las señales piloto, de nuevo se considera que existen ciertos recursos ocupados por las señales piloto de tal forma

que no pueden asignarse a la transmisión de datos de usuario. Por lo tanto, considerando un tamaño fijo para el canal de control de 3 símbolos OFDM y que las subportadoras piloto distribuidas a lo largo del canal de datos equivaldrían a un símbolo completo si se agruparan todas, se obtiene la distribución equivalente de subportadoras mostrada en la Figura 8.

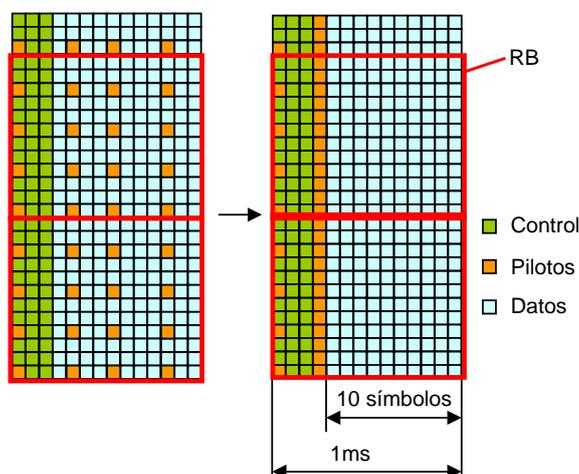


Figura 8. Multiplexación de las señales de control y datos

Es necesario recordar que el valor considerado en la plataforma para un TTI es de 1ms, de tal forma que el scheduling se actualizará cada milisegundo. Además, de acuerdo con la recomendación de LTE, se ha apostado por definir bloques de recursos radio (RB: Resource Block), de tal forma que un RB está compuesto de N_{SC} subportadoras durante N_S símbolos OFDM consecutivos siendo la unidad mínima de asignación en el sistema.

En concreto, se define el tamaño del RB como 12 subportadoras durante una subtrama completa. Por lo tanto, el tamaño efectivo del bloque de recursos es de 120 subportadoras. Esto es así ya que si cada subtrama de 1ms está compuesta por un total de 14 símbolos OFDM y el tamaño de bloque es de 12 subportadoras durante una subtrama, teniendo en cuenta que en cada subportadora hay que descontar los 3 símbolos del canal de control y el símbolo correspondiente a las señales piloto, nos da un total de 10 símbolos OFDM por subtrama y por subportadora y por lo tanto el tamaño efectivo del bloque de recursos es de 120 símbolos OFDM. También se ha asumido que en todas las subportadoras del RB se aplica el mismo esquema de modulación y codificación (MCS) y la misma potencia de transmisión. En la plataforma se ha considerado un ancho de banda total de 5MHz, lo que equivale a disponer de 27 RBs en cada subtrama. En la Tabla 1 se muestra el juego de parámetros considerado, conjuntamente con otros parámetros de configuración que se comentan más adelante. Estos parámetros están asociados a los procesos de monitorización del canal, procesos ARQ y configuración de las cadenas transmisoras y receptoras en estación base y móviles, respectivamente. La Tabla 2 incluye los diferentes esquemas de MCS contemplados, junto con las tasas de transmisión alcanzadas y requisitos de SINR necesarios para garantizar una probabilidad de error en la transmisión del bloque inferior al 1%.

Parámetro	Valor
Ancho de banda del sistema (BW)	5MHz
Subportadoras de la FFT (N_{FFT})	512
Separación entre subportadoras ($\bullet f$)	15kHz
Subportadoras con potencia (N_{used})	324
Duración del prefijo cíclico (T_{CP})	4,76 μ s
Periodo de scheduling (TTI)	1ms (14 símbolos OFDM)
Tamaño del canal de control	324 subportadoras durante 3 símbolos OFDM
Número de RBs	27
Tamaño del RB	12 subportadoras durante 1 TTI
Subportadoras de datos por RB	120
Máxima potencia de transmisión estación base (P_T^{max})	43dBm
Máxima potencia de transmisión en el RB (P_{RB}^{max})	32dBm
Ganancia de antena estación base (BS) (G_{TX})	15dB
Ganancia de antena terminal móvil (UE) (G_{RX})	0dB
Ganancia de diversidad transmisión (G_{Div_TX})	3dB
Ganancia de diversidad recepción (G_{Div_RX})	3dB
Patrón de antena horizontal (BS)	70 $^\circ$ (-3dB) con 20dB ratio front-to-back
Factor de ruido del receptor (F) en el UE	5dB
ARQ delay (\bullet_{ARQ})	6ms
Time between CQIs (T_{CQI})	1ms
CQI averaging time (W_{CQI})	4ms
CQI delay (\bullet_{CQI})	2ms

Tabla 1. Parámetros de simulación

Modulación	Tasa de código	Identificador de la MCS	SINR umbral (dB)	Tasa de información (bits/RB)
QPSK	1/2	0	10,2	120
	3/4	1	14	180
16QAM	1/2	2	17,5	240
	3/4	3	21,4	360
64QAM	2/3	4	27,4	480
	3/4	5	29,5	540

Tabla 2. Características de los formatos de transporte

2.1.3. Modelado del nivel físico y enlace

Para la evaluación de las diversas propuestas de asignación de recursos radio y gestión de interferencias, no es necesario un modelado explícito de la capa física ni del nivel de enlace. En concreto, el comportamiento del sistema a nivel de enlace se modela off-line, sin pérdida de generalidad en cuanto a los resultados obtenidos, a través de curvas que relacionan el nivel de SINR promedio obtenido en recepción con una tasa de error en el bloque (BLER: Block Error Rate) obtenida para cada MCS. En cualquier caso, lo que sí se modela de forma explícita en el simulador es el nivel de señal recibido considerando de forma realista los distintos efectos del canal e interferencia. No obstante, en la plataforma se trabaja con valores promedio de potencia, interferencia y relación señal a interferencia y ruido (SINR) en el RB. Esta decisión de trabajar con valores promedio en el RB es coherente con la decisión de que el RB es la unidad mínima de asignación, y con la decisión de aplicar la misma potencia y MCS a todas las subportadoras pertenecientes al mismo RB. De esta forma, a la hora de asignar recursos y adaptar la configuración de la transmisión, la estación base de las macroceldas trabaja con medidas de calidad del canal promedio en cada RB, para cada uno de los usuarios y en base a esas medidas fija la potencia de transmisión y la MCS a emplear a lo largo de todo el RB.

De esta forma, para decidir si un bloque de datos se ha recibido correctamente o si contenía errores y debe ser retransmitido, se trabaja con curvas de BLER frente a la SINR promedio para cada MCS, referidas anteriormente. Por lo tanto en recepción se lleva a cabo el siguiente proceso; En primer lugar se calcula el valor promedio de la SINR en el RB, que se basa en los valores promedio de potencia recibida (útil, interferencia y ruido) de cada estación base en el RB por el usuario en cuestión. En segundo lugar se obtiene el valor promedio de BLER para ese valor de SINR (P_e), a través de la curva de nivel de enlace. Por último se genera una variable aleatoria uniforme entre 0 y 1, de tal forma que si su valor es menor que P_e los datos transmitidos en ese RB contienen errores y por lo tanto tienen que ser retransmitidos. De forma contraria, si el valor de la variable aleatoria es superior a P_e se considera que los datos han sido recibidos correctamente. Este método está ampliamente extendido para efectuar evaluaciones a nivel de sistema y ha sido debidamente verificado, obteniéndose una diferencia despreciable con respecto a simulaciones con un modelado explícito de la capa física y requiriendo un tiempo de computación notablemente inferior.

2.1.3.1 Modelado explícito de la interferencia

Ya se ha comentado anteriormente que la interferencia intercelular es un factor muy importante y limitante en las prestaciones de los sistemas celulares, razón por la que ésta se modela de forma explícita. Para conseguir un modelado explícito, todas las estaciones base de las macroceldas generan su señal transmitida, de tal forma que cada usuario dispone de la señal recibida de cada una de las estaciones base vecinas, considerándose las pérdidas de propagación para todos los enlaces. Por lo tanto se obtiene para cada usuario la interferencia que sufre sumando el valor de potencia promedio que recibe en cada RB de cada una de las celdas interferentes. Se consideran celdas vecinas y por lo tanto interferentes las estaciones base del primer anillo (coloreadas con gris oscuro en la Figura 9) que son las celdas adyacentes a la que sirve al usuario (coloreada en gris claro en la Figura 9).

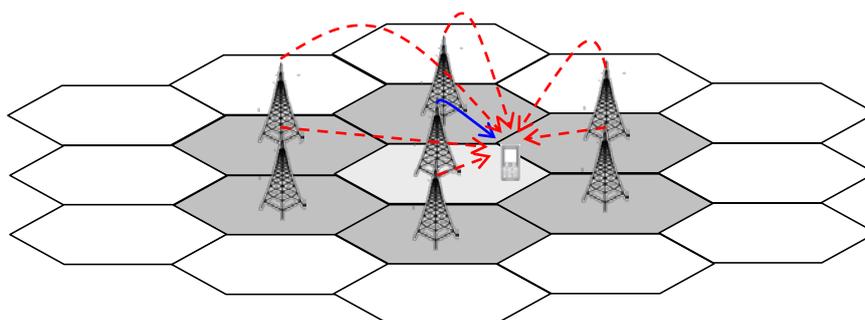


Figura 9. Transmisión explícita de interferencias (en líneas discontinuas)

2.1.4 Modelado del canal radio y características de transmisión y recepción

2.1.4.1 Modelado del canal

En las redes móviles, uno de los aspectos que limita la capacidad de la red es el canal radio, ya que se trata de un canal especialmente agresivo y con una fuerte atenuación para las frecuencias elevadas en las que normalmente trabajan este tipo de sistemas. Por lo tanto, para poder evaluar de una forma realista las prestaciones de las diferentes propuestas de

asignación de recursos y de control de interferencias es necesario realizar un modelo realista del canal, que sea capaz de modelar todos sus efectos. Concretamente la plataforma considera tres componentes de pérdidas:

- ✓ Pérdidas de propagación en función de la distancia.
- ✓ Desvanecimientos lentos o shadowing.
- ✓ Desvanecimientos rápidos debidos a la propagación multicamino, en distintos escenarios de movilidad.

Pérdidas de propagación

Para modelar las pérdidas de propagación introducidas por el canal en las simulaciones se ha empleado el modelo mostrado en la ecuación (1). Este modelo de pérdidas de propagación solo depende de la distancia entre el transmisor y el receptor y es un modelo utilizado con frecuencia en la evaluación de propuestas para los sistemas de banda ancha en desarrollo, y en particular es el modelo utilizado en el estándar E-UTRA del 3GPP.

$$L(dB)=128,1+37,6\log_{10}(d(Km)) \quad (1)$$

Desvanecimientos lentos

La presencia de grandes obstáculos en la trayectoria de la señal transmitida provoca pérdidas de señal que se conocen con el nombre de desvanecimientos lentos o shadowing. Para modelar el efecto del shadowing se emplea una variable aleatoria (ξ_k) que sigue una distribución lognormal con una desviación típica σ , la cual puede ajustarse en la plataforma. Concretamente se ha empleado un valor de 8dB. Además hay que tener en cuenta que en escenarios reales, los desvanecimientos provocados por la presencia de grandes obstáculos no varían excesivamente entre dos posiciones cercanas. Por lo tanto, para modelar esta correlación espacial, en la plataforma se incluye una distancia de correlación ($d_{cor}=50m$). El último aspecto a tener en cuenta para modelar de forma realista los desvanecimientos lentos es el hecho de que existe una correlación macroscópica entre las distintas celdas del escenario. Para modelar este aspecto se emplea otra variable aleatoria con distribución lognormal (ξ) y con una desviación típica σ . De esta forma, el valor definitivo del shadowing de un canal determinado, ξ_k , se obtiene ponderando la lognormal común a todos los caminos con la lognormal propia de cada uno de los caminos tal y como aparece en la ecuación (2). Generalmente, en escenarios urbanos es común emplear un valor de $a=b=0,5$, lo que implica que existe un 50% de correlación en el shadowing de las celdas vecinas.

$$\xi_k(dB)=\alpha\xi(dB)+\beta\xi(dB) \text{ con } a+b=1 \quad (2)$$

Desvanecimientos rápidos

El canal radio es un canal en el que existe propagación multicamino y estas múltiples reflexiones provocan desvanecimientos selectivos en frecuencia que se conocen como desvanecimientos rápidos o desvanecimientos Rayleigh.

En la plataforma se han incorporado unos modelos de canal que dependen de la velocidad de desplazamiento de los móviles y que son los que ha venido empleando el 3GPP

en el desarrollo de LTE. Estos modelos se denominan modelos extendidos y pueden observarse en la Tabla 3. Cabe destacar que la evolución de las potencias de los rayos se ajusta al modelo clásico de Jakes para el espectro Doppler.

Pedestrian A extendido (3km/h)		Vehicular A extendido (30km/h)		Typical Urban extendido (120km/h)	
Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)	Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)	Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)
0	0,0	0	0,0	0	-1,0
30	-1,0	30	-1,5	50	-1,0
70	-2,0	150	-1,4	120	-1,0
90	-3,0	310	-3,6	200	0,0
110	-8,0	370	-0,6	230	0,0
190	-17,2	710	-9,1	500	0,0
410	-20,8	1090	-7,0	1600	-3,0
		1730	-12,0	2300	-5,0
		2510	-16,9	5000	-7,0

Tabla 3. Modelos de propagación multicamino

Ruido AWGN

Además de las tres componentes de pérdidas que hemos visto, también se modela un ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN: Additive White Gaussian Noise), utilizando la expresión (3):

$$P_N = k \times T \times BW \quad (3)$$

donde k es la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$), T es la temperatura de trabajo del sistema (generalmente 290K) y BW es el ancho de banda considerado. Un aspecto importante a tener en cuenta es que el ancho de banda que hay que introducir en esta fórmula es el ancho de banda de la unidad mínima de asignación de recursos y no el ancho de banda total del sistema. Como en las simulaciones llevadas a cabo la unidad mínima de asignación de recursos es el RB, el ancho de banda que se introduce es 180KHz y se genera una muestra de ruido para cada RB.

2.1.4.2 Características de transmisión/recepción en la estación base y los terminales móviles

En relación con las características técnicas de la etapa de transmisión de la estación base hay que tener en consideración los aspectos que se comentan a continuación. En primer lugar, la potencia máxima de transmisión de la estación base está limitada a 43dBm para todo el ancho de banda del sistema (5MHz) y a 32dBm por cada RB, siendo esta una condición a tener en cuenta en las estrategias de asignación de recursos, en la medida en que la potencia es uno de ellos. Se define la ganancia de antena G_{TX} que es configurable en la plataforma. También se consideran dos antenas transmisoras en cada sector que suponen una ganancia en diversidad en transmisión, G_{Div_TX} . Los valores configurados aparecen en la Tabla 1. Por último, en cuanto al patrón de radiación de la antena en las simulaciones se ha empleado la antena tipo panel para sectores de 120°, que es una antena de 70° de apertura y una relación front-back de 20dB. El diagrama de radiación de la antena tipo panel puede observarse en la Figura 10 y su expresión matemática se muestra en la ecuación (4).

$$D(\theta) = -1 \times \min \left\{ 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, 20 \right\} \quad \text{con } \theta_{3dB} = 70^\circ \quad (4)$$

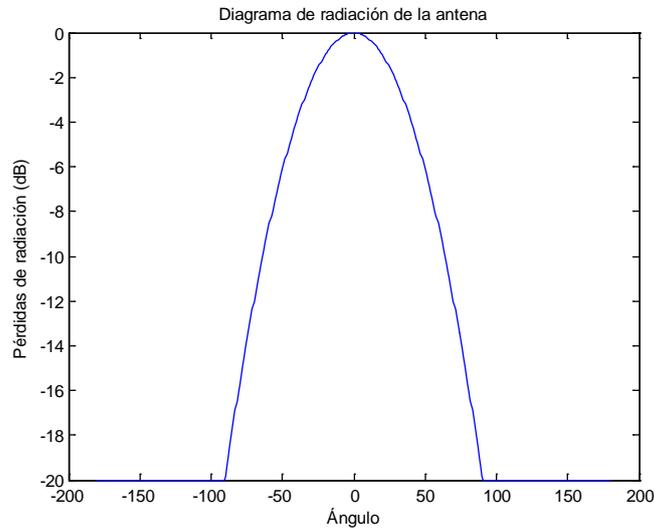


Figura 10. Patrón de radiación de la antena de las estaciones base

En cuanto a las características del receptor del móvil, la plataforma permite configurar la ganancia de antena del receptor (G_{RX}), el patrón de radiación de la antena, la ganancia por diversidad en recepción (G_{Div_RX}) y el factor de ruido del receptor (F). Los valores configurados aparecen reflejados en la Tabla 1.

2.1.5 Modelado de los procedimientos de monitorización del canal

Una de las principales funciones que llevan a cabo los terminales móviles es realizar las medidas de calidad del enlace y generar los correspondientes CQIs (Channel Quality Indicator), para asistir las futuras asignaciones de recursos por parte de la estación base. Estos informes sobre el estado del canal están constituidos por un valor promedio de calidad del enlace para cada RB, asumiendo que se pueden estimar idealmente las pérdidas del canal y la potencia interferente a partir de la señal recibida. Como medida de la calidad del canal en la plataforma se emplea la relación canal a interferencia y ruido (CINR: Channel to Interference and Noise Ratio), calculada como se muestra en la expresión (5).

$$CINR_k = \frac{h_k}{I_k + N_k} \quad (5)$$

donde h_k es la ganancia promedio del canal en el RB k , I_k es la potencia interferente promedio por portadora en el RB k y N_k es la potencia promedio del ruido AWGN. Una vez que se estima la CINR, multiplicando este valor por la potencia de transmisión se obtiene la estimación de la SINR promedio que observará el usuario en recepción, de tal forma que con esta información la estación base puede realizar la asignación de recursos (RBs y MCSs).

Aunque se asume que es posible estimar idealmente las pérdidas del canal y la potencia interferente a partir de la señal recibida, el sistema no asume modelado ideal de canal. En concreto, los terminales generan un nuevo CQI cada T_{CQI} milisegundos, promediando

el nivel de CINR en cada RB durante una ventana temporal de W_{CQI} milisegundos. Cada vez que se obtiene un CQI, se asume que transcurre un tiempo Δ_{CQI} antes de que el dato pueda ser utilizado por el scheduler de la estación base. Dicho tiempo permite modelar el retardo introducido por los procesos de codificación, transmisión y procesado de la información. Por tanto, el sistema modela de forma explícita los errores en la estimación de canal y de la interferencia, debidos a que la estación base no dispone en el momento de realizar la asignación de las condiciones exactas del canal. Los valores concretos de los parámetros T_{CQI} , W_{CQI} y Δ_{CQI} se encuentran reflejados en la Tabla 1.

2.2 Modelado de conexiones y procesos ARQ

En la plataforma, el modelado de las conexiones entre las estaciones base y los usuarios se lleva a cabo mediante dos buffers: el buffer de salida y el buffer de ARQ. Ambos buffers trabajan con política FIFO (First Input First Output). En el buffer de salida se almacenan los nuevos paquetes de datos que son generados por la fuente de tráfico y que están pendientes de ser transmitidos. En el caso del buffer ARQ, almacena los paquetes de datos que deben ser retransmitidos porque se han recibido erróneamente. La temporización de los procedimientos de ARQ se modela a través del parámetro Δ_{ARQ} , que representa el tiempo mínimo que debe transcurrir desde que un paquete es transmitido erróneamente hasta que puede ser retransmitido de nuevo. En este caso, el valor de Δ_{ARQ} , se ha fijado en 6ms, de acuerdo con las temporizaciones estimadas en el estándar LTE (ver Tabla 1). El buffer de ARQ tiene una prioridad de asignación superior al buffer de salida, de tal forma que en cada asignación de recursos a un usuario, los primeros paquetes que se van a transmitir van a ser los almacenados en el buffer de ARQ. Hay que destacar que para evitar que el mecanismo ARQ bloquee la comunicación con sucesivas retransmisiones del mismo paquete de datos, en la plataforma se ha definido un límite máximo de retransmisiones, n_{RTX} , tras las que el paquete de datos se descarta y que se ha fijado en 4.

2.2.1 Modelo de fuente de tráfico

En la plataforma se han implementado varios modelos de tráfico y concretamente para las simulaciones realizadas en este trabajo se ha empleado un modelo de tráfico a ráfagas. En concreto, en este trabajo se ha considerado un modelo genérico ON-OFF para el modelado de un servicio con restricciones de retardo. El modelo no se ajusta a ningún servicio específico (voz, video), pero permite valorar y comparar, sin pérdida de generalidad, las prestaciones de las distintas propuestas de coordinación de recursos entre macro y femtoceldas que se abordarán en este trabajo fin de máster. La fuente de tráfico consta de dos posibles estados: el estado de actividad (ON) y el estado de silencio (OFF). En el estado ON se genera un paquete de longitud L (240 bits) cada TTI, mientras que en el estado OFF no se generan paquetes. El tiempo que permanece la fuente de tráfico en cada uno de los estados se asume con distribución exponencial de medias T_{ON} (30ms) y T_{OFF} (90ms) para el estado ON y OFF respectivamente. Se define el factor de actividad del tráfico como $\alpha = T_{ON} / (T_{ON} + T_{OFF})$ ($\alpha = 0,25$). Con objeto de modelar un servicio con restricciones estrictas de retardo, se asume una cota máxima de retardo permitido para los paquetes de d_{max} TTIs (50ms), de tal forma que si un paquete supera este tiempo es descartado. Es decir, se asume un sistema con la aplicación de cotas de retardo hard. En este caso, un parámetro de evaluación para determinar el número

máximo de usuarios admisibles, manteniendo la calidad de servicio, es la probabilidad de descarte de paquetes. En concreto, se asume que ésta debe situarse por debajo del 1%.

Los paquetes de datos de longitud L (240 bits) generados por la fuente de tráfico se dividen en un número entero de bloques de datos denominados Transport Units (TUs), que es la cantidad mínima de datos que puede transmitir el sistema cuando un usuario recibe una asignación de recursos. Es decir, el tamaño del TU (120bits) se determina como la cantidad de datos que se transmiten en un RB empleando la MCS más baja del sistema (ver Tabla 2). Una vez que el paquete de datos se divide en TUs, estos TUs son almacenados en el buffer de salida de la conexión.

2.3 Esquemas de gestión de recursos

Las entidades asociadas a la gestión de recursos (incluyendo control de potencia, asignación de recursos frecuenciales y temporales, gestión de las retransmisiones y selección adaptativa de MCS) están localizadas en la estación base y controladas por el scheduling. Las decisiones de scheduling, realizadas cada TTI (1ms), se llevan a cabo de forma independiente en cada celda de la red y para los tres sectores que la componen, considerando las restricciones impuestas por los esquemas de coordinación de interferencias. La solución óptima para llevar a cabo simultáneamente todas estas tareas (scheduling temporal y frecuencial, adaptación de potencia y tasa y control de interferencia intercelular) no es conocida, encontrándose en la literatura múltiples propuestas, con diferentes grados de simplificación.

En este trabajo, la asignación de recursos es vista como un problema multidimensional. Primero, el esquema de coordinación de interferencia intercelular determina (estáticamente a escala de TTI) que parte de los recursos frecuenciales debe restringirse en cada celda/sector o área (interior, exterior) de la celda y posteriormente el scheduler selecciona en cada TTI que recursos se asignan a cada terminal. El scheduler se basa en dos componentes separadas, pero no independientes: temporal y frecuencial, que se aplican de forma secuencial. Primero, la componente en el dominio temporal (TD: Time Domain) después de chequear el nivel de ocupación de los buffers de las conexiones (datos nuevos y pendientes de retransmisiones), tiempo de espera, etc., determina en base a una métrica (por ejemplo, estado del canal, satisfacción de un determinado throughput, retardo, tamaño del buffer, etc.) el conjunto priorizado de terminales candidatos para recibir recursos en un TTI. Posteriormente, la componente en el dominio de la frecuencia (FD: Frequency domain) elige que recursos (RB y potencia) asignar a cada uno de esos terminales y la tasa permitida (MCS), de acuerdo con la información disponible sobre el estado del canal. En general, el objetivo de la componente TD es controlar la satisfacción de los requisitos de QoS de los terminales y una distribución equitativa de recursos entre todos ellos, mientras que la componente FD trata de optimizar el throughput global, asignando los recursos frecuenciales más apropiados a cada usuario para obtener el máximo provecho de la diversidad multicanal.

A continuación se detallan los esquemas considerados en ICIC, TD y FD, conjuntamente con los procedimientos seguidos para el ajuste de la potencia transmitida y de la MCS.

2.3.1 Principios básicos de los esquemas de coordinación

En cuanto a los esquemas de coordinación de interferencias en redes macrocelulares, en las simulaciones se han empleado dos esquemas. El primero es el denominado FFR con sectorización en la subbanda exterior que aparece mostrado en la Figura 5 y que se ha explicado en el punto 1.2.1. El segundo, que recibe el nombre de FFR_{opa} (FFR with frequency occupation ordering and power adaptation), se deriva del anterior incorporando ciertas mejoras. En concreto una de las mejoras consiste en controlar la variabilidad de la interferencia en la zona interior, para disminuir los errores en la asignación de recursos de esa zona. La segunda consiste en incorporar cierta flexibilidad en la asignación de potencia. Concretamente en el esquema FFR_{opa} se realiza una asignación ordenada de RBs en la zona interior, para concentrar las transmisiones en un subconjunto de recursos. Este aspecto es muy interesante en situaciones de baja carga, ya que con el esquema FFR convencional se observa un efecto de ON-OFF en la interferencia que provoca un aumento considerable de la BLER. Este efecto de ON-OFF se debe a que si no existe ninguna restricción en el uso de RBs en la zona interior, en el momento de la asignación un usuario puede ver un RB con baja interferencia y en el instante en el que transmite, un usuario de una celda vecina puede comenzar también a transmitir en ese RB provocando un aumento no estimado de la interferencia y provocando que los datos transmitidos se reciban erróneamente. Incluso en condiciones de carga alta, la potencia de transmisión en el RB puede variar como resultado de las decisiones de scheduling realizadas en la celda. A todo esto hay que añadir la variabilidad introducida por el canal radio entre el móvil y cada una de las celdas interferentes, donde el shadowing experimentado en cada enlace es el factor más dominante. En definitiva, la variabilidad en la interferencia se traduce en que las condiciones reales de interferencia en las que el usuario recibe la señal difieren de aquellas estimadas previamente y que son con las que se realizó la asignación de recursos. Por tanto, una alta variabilidad en la ICI provocará un gran número de errores en la asignación de recursos que aumentarán la tasa de error en la recepción de los bloques de datos (BLER). La variabilidad en la ICI es por consiguiente un factor a tener en cuenta a la hora de diseñar mecanismos de control de la interferencia y algoritmos de asignación dinámica de recursos.

2.3.1.1 Reparto frecuencial

De forma genérica, en ambos esquemas el conjunto de recursos disponibles en la estación base (27RBs) se dividen en dos subbandas: la subbanda interior con 18 RBs y la subbanda exterior con 9RBs. En la subbanda interior los RBs de dicha subbanda pueden ser ocupados por usuarios de cualquier sector de la celda. En la subbanda exterior, por el contrario, se aplica sectorización de tal forma que sólo los usuarios del sector pueden ocupar los RBs asignados en la subbanda exterior a dicho sector (3RBs).

2.3.1.2 Asignación de potencia

La potencia de transmisión en la subbanda exterior es más alta que en la subbanda interior, con el fin de alcanzar a los usuarios situados en el límite de la celda. A la hora de definir la potencia, hay que tener en cuenta que de forma genérica se definen dos límites en cuanto a la potencia transmitida: por una parte, la potencia transmitida en un RB no puede ser superior a un límite P_{RB}^{max} , mientras que la potencia total transmitida en la celda no puede

exceder P_T^{max} . De este modo, si denominamos P_i a la potencia transmitida en el RB i y P_{out} a la potencia total transmitida en la celda, las restricciones de potencia imponen:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{N_{RB}} P_i \leq P_T^{max} \quad \text{con} \quad P_i \leq P_{RB}^{max} \quad (6)$$

siendo N_{RB} el número total de RBs asignables en la estación base. Tomando como referencia el esquema FFR, los algoritmos de asignación de recursos definen dos niveles iniciales de potencia transmitida: M_{med}^0 en la subbanda interior y M_{med}^1 en la subbanda exterior. Dichos valores se calculan asumiendo que ninguno de ellos excede P_{RB}^{max} y, en el caso de que todos los RBs sean asignados en una subtrama, la potencia total transmitida nunca supere el límite P_T^{max} . Generalmente, el valor de M_{med}^1 se define como un incremento Δ en dB con respecto a M_{med}^0 calculado a partir de la relación de distancias de cobertura de ambas subbandas. Así, las máscaras de potencia se calculan como se muestra en la ecuación (7), donde $N_{RB,l}^s$ es el número de RBs que comprende el nivel l de la máscara ($l = 0, \dots, L-1$) en el sector s ($s = 0, \dots, S-1$), siendo S ($S=3$) el número de sectores de la celda y L ($L=2$) el número de niveles de la máscara. Tomando los valores $M_{med}^0=26dBm$ y $M_{med}^1=31dBm$ para la máscara y asumiendo que para los 3 sectores se cumple: $N_{RB,0}^s=6$ y $N_{RB,1}^s=3$, la potencia máxima transmitida es 42,67dBm, con lo que se cumple con las restricciones de P_{RB}^{max} y P_T^{max} impuestas en la Tabla 1.

$$\sum_{s=0}^2 \sum_{l=0}^1 N_{RB,l}^s \times 10^{\frac{M_{med}^l (dBm/RB)}{10}} = P_T^{max} \quad \text{con} \quad P_i^s \leq P_{RB}^{max} \quad (7)$$

$$M_{med}^1 = M_{med}^0 + \Delta$$

A la hora de determinar la potencia con la que se transmite un RB, se ha optado por dos posibles alternativas: en primer lugar, una asignación con potencia constante, donde la potencia asignada en el RB es directamente el valor M_{med}^l , siendo l la subbanda a la que pertenece el RB. En este caso, asociado a la implementación de FFR, todo el peso de la adaptación de la transmisión a las condiciones de canal particulares del usuario recae en el mecanismo de adaptación de la MCS. Esta opción resulta más deseable que un esquema de selección adaptativa de potencia ajustada al cumplimiento de una determinada tasa o bien de selección adaptativa de potencia y MCS, en la medida en que limita la variabilidad de la interferencia. A pesar de ello, como se explicará con mayor detalle, en FFRopa se aplica una segunda alternativa que pasa por un ajuste de la potencia de transmisión junto con la MCS basándose en las medidas de calidad del canal al usuario. Sin embargo, para reducir la variabilidad de la interferencia, el rango de valores de la potencia de transmisión viene acotado por una potencia mínima (M_{min}) y una potencia máxima (M_{max}) en cada subbanda. Dichos valores se calculan fácilmente para cada subbanda como un decremento Δ_{min} o un incremento Δ_{max} sobre el correspondiente valor M_{med} . Concretamente se han definido los siguientes valores: $\Delta_{max}=\Delta_{min}=3dB$.

2.3.1.3 Adaptación de tasa

En lo que respecta a la selección del esquema de MCS, atendiendo a las medidas de calidad del enlace recibidas de los terminales móviles, la estación base define una MCS objetivo del usuario k (MCS_k), que es la MCS más baja que le permite transmitir su tasa

requerida por TTI ($T_{req,k}$) en el menor número de RBs n_k (asumiéndose en adelante $n_k = 1$), satisfaciendo siempre los requerimientos de SINR mínima para dicha MCS. En este caso en particular, la tasa requerida se corresponde con la transmisión de los TUs que constituyen cada paquete de datos en un RB. La asignación de recursos se realiza inicialmente con esta MCS objetivo, aunque si las condiciones de canal no permiten la asignación del usuario con una potencia dada, se intentará asignarle una MCS más baja ocupando un mayor número de RBs.

Cabe destacar dos aspectos importantes que caracterizan a ambos algoritmos. El primero es el hecho de que a la hora de asignar recursos adicionales, entendiendo por recursos adicionales cuando un usuario que ya ha recibido una primera asignación aún dispone de datos en los buffers y va a recibir más recursos, en primer lugar se intenta mejorar la MCS en los RBs que han sido asignados al usuario para intentar mejorar la tasa. Hay que tener en cuenta que todos los RBs asignados al usuario deben cumplir con los requisitos de SINR de la nueva MCS. Si no es posible aumentar la MCS se intentará asignar un RB adicional, que deberá transmitirse con la misma MCS que los RBs asignados previamente. Mediante esta asignación adicional de recursos se pretende facilitar que los usuarios puedan recuperar retrasos en los buffers.

El segundo aspecto que caracteriza a estos algoritmos es que después de realizar la asignación de un RB se vuelven a calcular los índices de prioridad temporal de todos los usuarios, se reordenan los usuarios con la nueva prioridad y se escoge al usuario más prioritario para la siguiente asignación. De esta forma, un usuario puede recibir varias asignaciones en un mismo TTI si en sus buffers hay varios paquetes que acumulan mucho retraso.

2.3.1.4 Principios básicos del FFRopa

Centrándonos en el esquema FFRopa, la gestión de recursos trata de mantener estable el conjunto de RBs en los que se llevan a cabo las transmisiones en la zona interior y controlar así la variabilidad de la interferencia. En concreto, la asignación se realiza de la siguiente forma: los recursos reservados a la subbanda interior se dividen en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna a cada uno de los tres sectores de cada celda. En primera aproximación, se realiza una asignación ordenada de RBs y concretamente se sigue el ordenamiento circular mostrado en la Figura 11. Se intenta así conseguir que las transmisiones de cada sector queden confinadas siempre dentro del mismo conjunto de recursos frecuenciales. Además las celdas contiguas comienzan a asignar los recursos en diferentes puntos de cada una de las subbandas, de tal forma que en condiciones de baja carga se consigue que celdas contiguas empleen recursos ortogonales minimizando la ICI. Sin embargo la asignación ordenada limita en exceso la posibilidad de obtener beneficio de la diversidad multiusuario y multicanal en el scheduling frecuencial. Por ello, en realidad la asignación no es estrictamente ordenada, sino que el esquema define un grupo de RBs dentro de la subbanda preasignada a cada sector, que recibe el nombre de grupo inicial (SG: Starting Group). El número de RBs que componen este grupo inicial puede variar dinámicamente a lo largo del tiempo. En concreto, para hacer una estimación de los RBs que se van a necesitar en un TTI y por lo tanto definir el grupo inicial una opción es tomar el número de RBs que han sido ocupados en el TTI anterior y es la opción por la que se ha apostado. Inicialmente, los usuarios, ordenados de acuerdo con el criterio fijado en el scheduling temporal, irán recibiendo

asignaciones en los RBs en los que observa mejores condiciones dentro del grupo inicial y una vez que se hayan ocupado los RBs que forman el grupo inicial se seguirán asignando el resto de RBs siguiendo la ordenación.

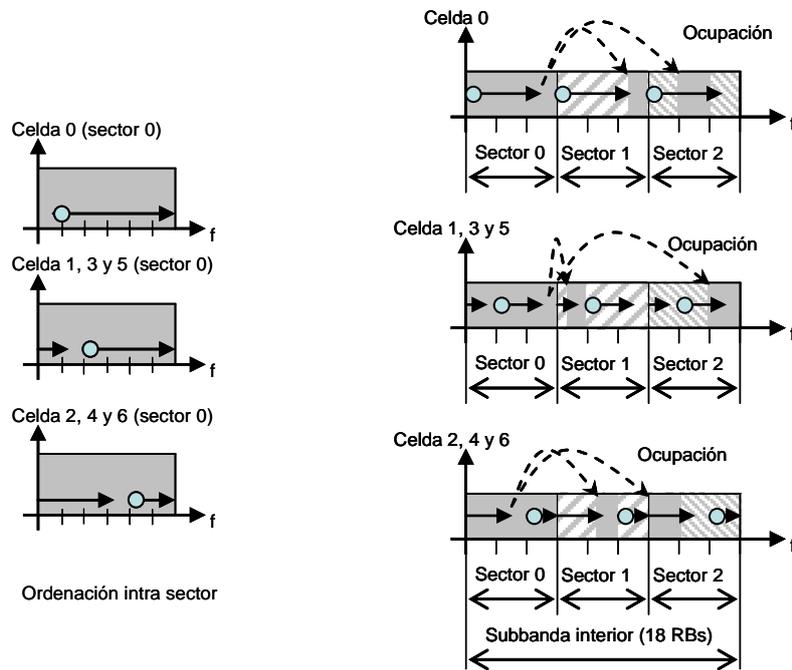


Figura 11. Asignación ordenada de RBs en la subbanda interior

Aunque inicialmente los recursos frecuenciales destinados a la zona interior se dividen en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna a un sector, cuando un sector ocupa todos los RBs de su subbanda comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores. Concretamente, y dado que el scheduling se hace para la lista ordenada de usuarios de toda la celda, cuando el sector en el que se encuentra ubicado el usuario tiene completa su subbanda preferente, se comenzará a robar RBs del sector que tenga menor ocupación. Además, como se muestra en la Figura 11, por ejemplo el sector 0 comenzará a robar el primer RB libre de la subbanda preasignada al sector 1. Después, el sector 1 continuará asignando el resto de RBs de su subbanda siguiendo el ordenamiento descrito. Para los recursos reservados a la zona exterior se emplea una sectorización estricta como ya se ha comentado. A modo de resumen puede observarse en la Figura 12 como sería la asignación de recursos del esquema FFRopa.

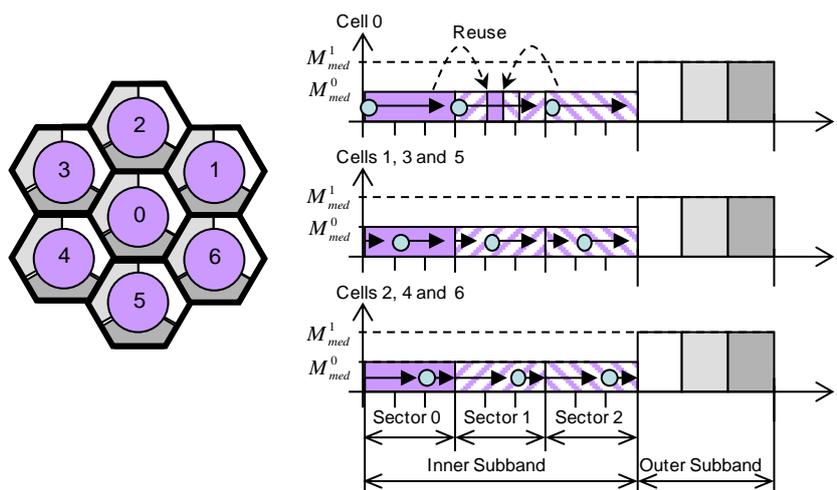


Figura 12. Asignación de recursos del esquema FFRopa

Además de esta asignación ordenada de RBs comentada, el esquema FFRopa también incorpora una asignación adaptativa de potencia. Si se emplea potencia constante como en el caso del esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior, los usuarios reciben el valor de potencia que indica la máscara en el RB correspondiente, que podemos denominar M_{med} . Como se ha dicho, el objetivo de emplear una potencia constante en las asignaciones es disminuir la variabilidad de la interferencia, sin embargo como contrapartida tenemos el hecho de que un usuario puede quedarse sin recibir asignación si la potencia requerida supera la máscara, aunque sea por muy poca potencia. Por lo tanto esta situación lleva a plantearse un ajuste adaptativo de la potencia de transmisión que permita asignar a un mayor número de usuarios pero limitando a su vez la variabilidad de la interferencia. Este ajuste adaptativo de potencia solo se lleva a cabo en la zona interior, mientras que en los recursos de la zona exterior la potencia se mantiene constante para limitar lo máximo posible la variabilidad en la interferencia.

El algoritmo de adaptación se representada esquemáticamente en la Figura 13. La potencia requerida por el usuario k en el RB i se calcula como $P_{i,k} = SINR_{req}/CINR_i^k$ (donde $SINR_{req}$ es la SINR mínima de la MCS que se pretende asignar al usuario) y se representa mediante una línea discontinua. Los usuarios con una potencia requerida inferior a M_{med} (UE0, UE2 y UE3), crean un margen de potencia $M_{med} - P_{i,k}$ que se invierte en incrementar la potencia de transmisión para los usuarios que requieren una potencia superior a M_{med} (UE1 y UE4). En la Figura 13 puede observarse como la potencia que le sobra por ejemplo al UE0 puede invertirse en los usuarios UE1 y UE4 permitiendo que aumenten su potencia de transmisión y sean capaces de recibir asignación. Para evitar que estos ajustes adaptativos de potencia aumenten en exceso la variabilidad de la interferencia, la potencia asignada a cada usuario siempre debe permanecer entre dos umbrales M_{min} y M_{max} . De tal forma que si la potencia requerida por un usuario es inferior al umbral M_{min} el sistema asume que la potencia requerida por ese usuario es M_{min} . Este sería el caso del UE2 mostrado en la Figura 13. Por el contrario, si la potencia requerida por un usuario supera el umbral M_{max} el sistema asume que ese usuario no va a poder recibir asignación.

Aunque la potencia finalmente asignada puede ser directamente el resultado de la adaptación de potencia descrita anteriormente, se ha juzgado conveniente realizar la asignación de potencia definitiva al final del algoritmo, de modo que se puede ajustar a las asignaciones finalmente realizadas. En este sentido, mientras los usuarios van siendo asignados, la potencia preasignada a ellos es M_{med} si su potencia requerida es inferior a M_{med} , o directamente la potencia requerida $P_{k,i}$ si la excede, mientras que el margen de potencia logrado se va actualizado de acuerdo a la potencia realmente requerida por los usuarios. De este modo, aunque se esté preasignando una potencia M_{med} , el algoritmo conoce que es capaz de obtener hasta $M_{med} - P_{k,i}$ de este usuario en caso necesario.

Una vez se han realizado todas las asignaciones de RBs, se procede a reajustar la potencia preasignada de modo que no se exceda el límite máximo de potencia transmitida en la celda. Para ello, comenzamos computando la potencia total asignada hasta el momento. Si esta potencia no excede el límite máximo P_T^{max} , porque ningún usuario ha excedido M_{med} o hay RBs sin asignar que compensan el exceso de potencia, se valida la preasignación de potencia realizada. Así, los usuarios con buenas condiciones de canal experimentarán un gran margen frente a interferencias al tener asignada una potencia igual a M_{med} , lo que permitirá incrementar su MCS para transmitir de forma más eficiente. Cuando la potencia total preasignada excede el límite máximo permitido en la celda, es necesario extraer potencia de los usuarios con mejores condiciones de canal. En nuestro caso, hemos optado por extraer potencia de todos los usuarios con una potencia requerida inferior a M_{med} de forma proporcional al margen de potencia que experimentan. Así, más potencia es tomada de los usuarios con mayor margen y viceversa, lo que supone un tratamiento más igualitario de los usuarios y genera un margen de potencia frente a las variaciones del canal o de la interferencia. Como puede observarse también en la Figura 13, para compensar los excesos de potencia de los usuarios UE1 y UE4 se extrae más potencia de los usuarios que disponen de más margen de potencia (como por ejemplo el UE2).

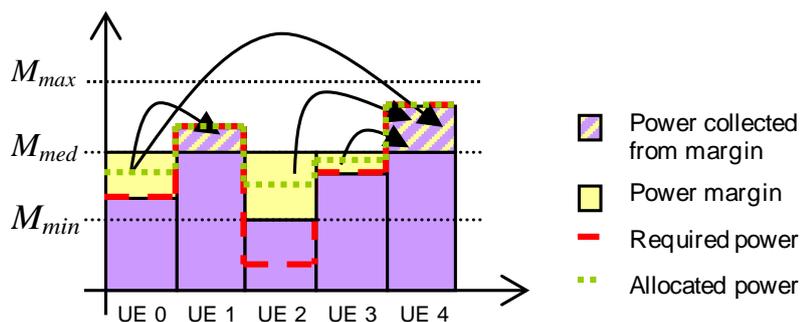


Figura 13. Asignación adaptativa de potencia

2.3.2 Algoritmos de scheduling temporal

Como se ha comentado, la plataforma de simulación permite la aplicación de diferentes estrategias de scheduling temporal. En este trabajo, la estrategia aplicada, a la que se ha denominado retardo, obtiene para cada paquete i -ésimo asociado a un terminal j , una marca de prioridad, que se calcula, de acuerdo con la expresión (8), como el cociente entre el

retardo acumulado del paquete en TTIs W_i^j y la cota máxima de retardo (d_{max}) que soporta el tipo de tráfico concreto también en TTIs.

$$W_i^j/d_{max} \quad (8)$$

De esta forma, la prioridad de un usuario/conexión se asocia a la marca de prioridad del paquete situado en la cabecera del buffer. Una vez calculada la prioridad para todas las conexiones se pueden ordenar de mayor a menor prioridad, para que la primera conexión que reciba asignación sea la conexión con el paquete que acumula mayor retraso ponderado sobre su cota máxima.

2.3.3 Descripción detallada de los algoritmos de scheduling frecuencial

A continuación se describen los principales pasos que se llevan a cabo en los algoritmos FFR y FFRopa.

2.3.3.1 Algoritmo FFR

- 1) Se ordenan las conexiones activas que tengan almacenados paquetes en los buffers de acuerdo al scheduling temporal y se determina la MCS objetivo para cada conexión k , MCS_k . La MCS objetivo se define como la MCS más baja necesaria para satisfacer la tasa requerida por TTI (R_k) por la conexión en $n_{RB,k}$ RBs. Se ha optado por configurar $n_{RB,k}=1$.
- 2) Siguiendo el orden de prioridad marcado por el scheduling temporal y mientras existan RBs libres se intenta asignar a la conexión más prioritaria. Vamos a suponer que la conexión más prioritaria es la conexión k , pudiéndose dar dos situaciones:
 - a. Si la conexión no ha recibido ninguna asignación en este TTI se intentan asignar $n_{RB,k}$ RBs libres consecutivos en la subbanda interior, escogiendo los RBs donde el usuario observa mejores condiciones de canal y siempre que se cumpla la SINR de su MCS objetivo en todos los RBs a asignar. Si existe al menos una asignación posible, se busca la que mejor SINR proporcione (si es que hay varias asignaciones posibles), se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si no existe ninguna asignación posible, se realiza un proceso de renegociación donde los usuarios ya asignados previamente pueden ser desplazados a otros RBs donde cumplan los requisitos de SINR para permitir la asignación del nuevo usuario. Si esta renegociación puede llevarse a cabo, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si esta renegociación no es posible, se intenta asignar al usuario en la subbanda exterior del sector correspondiente, realizando también renegociación si no puede ser asignado en los RBs que están libres. Si la asignación tampoco es posible en la subbanda exterior, se asume que el usuario requiere un RB más ($n_{RB,k} = n_{RB,k} + 1$) y de esta forma una MCS más baja con unos requisitos de SINR menores. Este proceso de asignar un RB más se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la nueva MCS objetivo es la MCS más baja. En el momento en el que el usuario no puede recibir asignación y su MCS es la más baja se vuelve al paso 2 con la conexión $k+1$.

- b. Si la conexión ya ha recibido una asignación previa en este TTI se intenta aumentar la MCS. Hay que tener en cuenta que el usuario debe cumplir los requisitos de SINR de la nueva MCS en todos los RBs asignados previamente y que la tasa total cursada con la nueva MCS no exceda el número de TUs que el usuario tiene en los buffers. Si el aumento de MCS es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si el aumento de MCS no es posible se asigna un RB adicional utilizando la MCS asignada previamente. Primero se intentará asignar ese RB adicional en la subbanda interior, aplicando renegociación si fuese necesario y posteriormente si no ha sido posible realizar la asignación en la subbanda interior se intentaría asignar el RB en la subbanda exterior del sector correspondiente aplicando de nuevo renegociación si fuese necesario. Si la asignación del RB adicional es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si la asignación no ha sido posible, se disminuye la cantidad de datos que se pretendía transmitir en un TU, disminuyéndose de esta forma la MCS deseada en todos los RBs e intentando la nueva asignación. Este proceso de disminuir un TU se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la tasa que se lograría transmitir con el RB adicional sea igual o menor a la que tenía asignada el usuario con la asignación previa.
- 3) Finalmente se intenta mejorar la MCS asignada en todos los RBs de aquellas conexiones que aun tienen paquetes en sus buffers y cuya tasa asignada no supere la tasa requerida por TTI (R_k).

2.3.3.2 Algoritmo FFRopa

- 1) Se ordenan las conexiones activas que tengan almacenados paquetes en los buffers de acuerdo al scheduling temporal y se determina la MCS objetivo para cada conexión k , MCS_k .
- 2) Se determina para cada uno de los sectores de la macrocelda el tamaño del grupo inicial (SG) en base a los RBs asignados en la subtrama anterior.
- 3) Siguiendo el orden de prioridad marcado por el scheduling temporal y mientras existan RBs libres se intenta asignar a la conexión más prioritaria. Vamos a suponer que la conexión más prioritaria es la conexión k , pudiéndose dar dos situaciones:
 - a. Si la conexión no ha recibido ninguna asignación en este TTI se intentan asignar $n_{RB,k}$ RBs libres consecutivos en el SG de su sector. Si el SG de su sector está ya asignado se pasa al paso 4. Si por el contrario quedan RBs libres en el SG se intenta realizar la asignación, llevando a cabo renegociación si fuese necesario. Si la asignación es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 3. Si la asignación no ha sido posible, se intenta asignar al usuario en la subbanda exterior del sector correspondiente, realizando también renegociación si no puede ser asignado en los RBs que están libres. Si la asignación tampoco es posible en la subbanda exterior, se asume que el usuario requiere un RB más ($n_{RB,k} = n_{RB,k} + 1$) y de esta forma una MCS más baja con unos requisitos de SINR menores. Este proceso de asignar un RB más se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la nueva MCS objetivo es la

- MCS más baja. En el momento en el que el usuario no puede recibir asignación y su MCS es la más baja se vuelve al paso 3 con la conexión $k+1$.
- b. Si la conexión ya ha recibido una asignación previa en este TTI se intenta aumentar la MCS. Hay que tener en cuenta que el usuario debe cumplir los requisitos de SINR de la nueva MCS en todos los RBs asignados previamente y que la tasa total cursada con la nueva MCS no exceda el número de TUs que el usuario tiene en los buffers. Si el aumento de MCS es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 3. Si el aumento de MCS no es posible se asigna un RB adicional utilizando la MCS asignada previamente. Primero se intentará asignar ese RB adicional en el SG del sector, aplicando renegociación si fuese necesario. Si el SG está ocupado se pasa al paso 4. Si no ha sido posible realizar la asignación en el SG se intentaría asignar el RB en la subbanda exterior del sector correspondiente aplicando de nuevo renegociación si fuese necesario. Si la asignación del RB adicional es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 3. Si la asignación no ha sido posible, se disminuye la cantidad de datos que se pretendía transmitir en un TU, disminuyéndose de esta forma la MCS deseada en todos los RBs e intentando la nueva asignación. Este proceso de disminuir un TU se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la tasa que se lograría transmitir con el RB adicional sea igual o menor a la que tenía asignada el usuario con la asignación previa.
- 4) Si todos los RBs del SG del sector ya han sido asignados se intenta asignar al usuario en los RBs de la subbanda interior preasignada al sector pero esta vez siguiendo el orden. Si se da el caso de que la subbanda interior preasignada al sector ya esté ocupada se ocupan RBs de las subbandas de otros sectores, siguiendo también la ordenación en la asignación de RBs. Se intentará primero ocupar RBs del sector con menor número de conexiones con tráfico pendiente. Si el usuario no puede ser asignado en el RB siguiendo la ordenación se lleva a cabo una renegociación. Si la asignación no ha sido posible se intenta asignar al usuario en la subbanda exterior aplicándose renegociación si fuese necesario. Si la asignación tampoco es posible pueden darse dos situaciones
 - a. Si se trata de la primera asignación del usuario en este TTI, se asume que el usuario requiere un RB más y por lo tanto una MCS más baja y se intenta de nuevo realizar la asignación.
 - b. Si se trata de una asignación adicional, se disminuye la cantidad de datos que se pretendía transmitir en un TU, disminuyéndose de esta forma la MCS deseada en todos los RBs e intentando la nueva asignación.
 - 5) Si la potencia asignada supera la potencia máxima que puede transmitir la estación base se procede a ajustar la potencia. Como ya se ha comentado en la explicación de FFRopa se extraerá más potencia de aquellos usuarios que posean un mayor margen de potencia.
 - 6) Finalmente se intenta mejorar la MCS asignada en todos los RBs de aquellas conexiones que aun tienen paquetes en sus buffers y cuya tasa asignada no supere la tasa requerida por TTI (R_k).

3. Propuestas de asignación de recursos en despliegues heterogéneos

3.1 Planteamiento inicial

En el punto 1.2 ya hemos comentado que uno de los principales problemas de los despliegues femtocelulares es la gestión de interferencias para evitar una degradación en las prestaciones de la red. En este trabajo fin de máster nos vamos a centrar en despliegues co-canal, es decir, despliegues en los que las femtoceldas van a emplear los mismos recursos frecuenciales que las macroceldas sobre las que son instaladas. Esta decisión la hemos tomado debido a que las soluciones que contemplan que las femtoceldas empleen recursos ortogonales conllevan un uso ineficiente del espectro. Debido a este motivo en la literatura también se centran en este tipo de soluciones co-canal.

En el ANEXO A se realiza una revisión detallada del estado del arte, pero podemos destacar el hecho de que fundamentalmente podemos clasificar las diferentes propuestas de gestión de interferencias en tres grupos: centralizadas, distribuidas cooperativas y distribuidas no cooperativas. Los esquemas centralizados son principalmente beneficiosos en las situaciones en las que las femtoceldas son desplegadas por el operador y de esta forma son controladas y dirigidas por un nodo central del operador. Tal y como podemos observar en la literatura los despliegues por los que más se está apostando son aquellos en los que son los propios usuarios los que instalan las femtoceldas, por ello dejamos de lado los esquemas centralizados y nos centramos en esquemas distribuidos.

En cuanto a los esquemas distribuidos cooperativos, tal y como aparece en [1] y [14] aun quedan muchas cuestiones abiertas sobre cómo puede implementarse la comunicación entre las femtoceldas vecinas (puede ser a través de la interfaz aire o mediante el enlace backhaul) y sobre qué clase de información pueden compartir las femtoceldas. Por lo tanto se ha considerado centrarse en esquemas distribuidos no cooperativos.

Como se ha explicado en el punto 2, la plataforma de simulación de la red macrocelular emplea fundamentalmente los esquemas de coordinación de interferencias FFR y FFRopa. Por lo tanto se ha apostado por considerar las propuestas de gestión de interferencias en redes heterogéneas que puedan adaptarse a este tipo de esquemas. En concreto podemos destacar por ejemplo la propuesta realizada en [5] y [15] que básicamente consistía en que las femtoceldas empleen los recursos frecuenciales que no son empleados en la zona de la macrocelda en la que son desplegadas. En la misma línea también está la propuesta explicada en [9].

Otro concepto que cabe reseñar del esquema explicado en [4] es el empleo de máscaras de potencia. Es decir, emplear unos recursos frecuenciales para la zona exterior de la femtocelda sobre los que se transmitirá con mayor potencia y la otra parte de los recursos emplearlos para la zona interior sobre los que se transmitirá con menor potencia. De esta propuesta también hay que destacar el planteamiento de que los recursos frecuenciales destinados a la zona interior pueden reutilizarse en todas las femtoceldas mientras que para

los recursos frecuenciales empleados para la zona exterior hay que realizar algún tipo de coordinación entre femtoceldas vecinas para evitar una interferencia excesiva, ya que sobre esos recursos se transmite con mayor potencia.

3.2 Descripción de la red heterogénea

En este punto se describen las modificaciones e implementaciones que se han llevado a cabo sobre la plataforma de simulación ya existente (descrita en el punto 2) para permitir el despliegue de femtoceldas sobre la red macrocelular y poder integrar las propuestas de gestión de recursos y control de interferencias. Todos los aspectos relativos al modelado del nivel físico y de enlace del sistema macrocelular existente se han mantenido, así como el modelado del canal radio. De la misma forma se ha mantenido el modelado de los procedimientos de monitorización del canal y el modelado de las conexiones y los procesos ARQ. A continuación se describen las características del despliegue femtocelular que se ha implementado así como las estrategias de gestión de recursos propuestas.

3.2.1 Despliegue de las femtoceldas

En este trabajo se ha añadido todo lo necesario sobre la plataforma de simulación para que pueda realizarse un despliegue de femtoceldas sobre una red macrocelular. Fundamentalmente se han implementado dos tipos de despliegues que son los que se han empleado en las simulaciones. El primer tipo de despliegue consiste en colocar una femtocelda en cada una de las macroceldas existentes, que en nuestro caso son 19. Este tipo de escenario nos permite evaluar cual es la influencia de desplegar femtoceldas sobre la cobertura de macroceldas ya existentes. Hay que tener en cuenta que las femtoceldas emplean el mismo ancho de banda que las macroceldas. La plataforma de simulación nos permite configurar la posición concreta sobre la que queremos desplegar la femtocelda. Esta posición se designa seleccionando la distancia y el ángulo respecto al eje horizontal tomando como punto de referencia el centro de la macrocelda y por lo tanto la estación base de la macrocelda. La posición seleccionada es la misma para las 19 femtoceldas que se van a desplegar y en la Figura 14 puede verse un ejemplo. Las diferentes pruebas y simulaciones, así como las diferentes propuestas de coordinación que se han evaluado para este despliegue se explican en detalle en el punto 3.3 de la memoria.

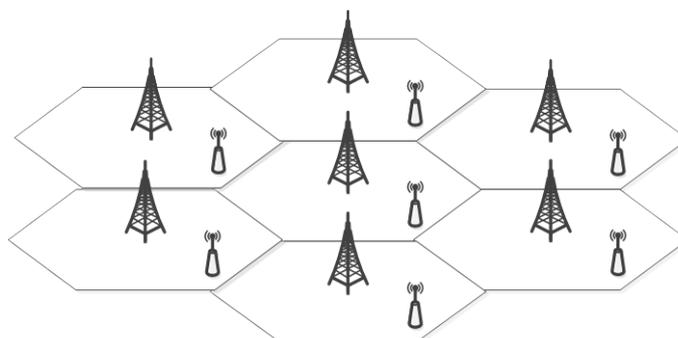


Figura 14. Ejemplo del despliegue de una femtocelda en cada macrocelda

El segundo tipo de despliegue consiste en colocar una rejilla de 3x3, de tal forma que en cada uno de los cuadrados que forman la cuadrícula se instala una femtocelda. Este

escenario es similar a un escenario propuesto por el 3GPP en [17] y sirve para evaluar diferentes propuestas de coordinación entre femtoceldas vecinas. Cada uno de los cuadrados que forman la rejilla tiene unas dimensiones de 10x10m y la femtocelda se coloca en el centro del cuadrado, de tal forma que se despliegan un total de 9 femtoceldas. En la Figura 15 podemos ver la distribución de este escenario. La plataforma permite seleccionar la posición sobre la que se va a desplegar la rejilla, la cual solo se despliega en la macrocelda 0. Esta posición se determina mediante la distancia y el ángulo respecto al centro de la macrocelda como en el caso anterior. Los diversos esquemas de coordinación propuestos se explican en detalle en el punto 3.4 de la memoria.

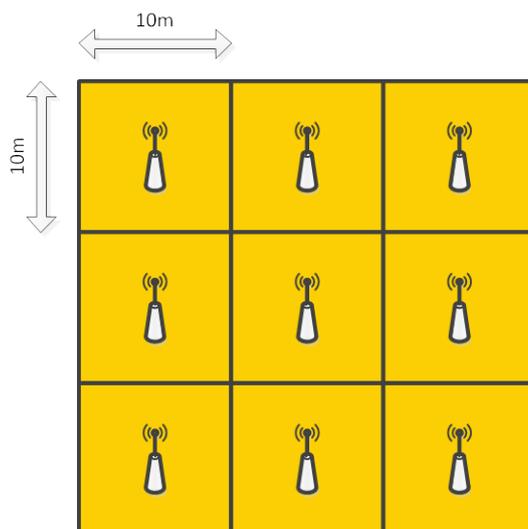


Figura 15. Distribución de la rejilla 3x3

La plataforma permite distribuir los usuarios de forma uniforme dentro del radio de cobertura de las femtoceldas. Debido a que los usuarios no están estáticos, sino que se mueven (con una velocidad igual a 3Km/h), existen dos opciones: permitir que los usuarios abandonen las femtoceldas y se conecten a la macrocelda sobre la que está desplegada o limitar el movimiento de los usuarios para que permanezcan siempre dentro del radio de cobertura de la femtocelda y por lo tanto permanezcan siempre conectados a la femtocelda. Es decir, el alcance de este trabajo no incluye la consideración de esquemas de selección de nodo de acceso, por lo que se ha optado por limitar el movimiento de los usuarios para que siempre se mantengan dentro del área de cobertura la femtocelda y así de esta forma no alteramos la distribución de carga de las macroceldas, que como se ha comentado se ha considerado homogénea para el desarrollo de este trabajo. En el caso de despliegues con una sola femtocelda, se ha considerado una cobertura para la femtocelda de 100m de radio. Mientras, que en el escenario de rejilla el radio de cobertura de la femtocelda se sitúa entorno a 5m, para respetar el tamaño de los cuadrados que forman la rejilla. La plataforma permite seleccionar el número de usuarios que generan tráfico en cada femtocelda, los cuales se distribuirán uniformemente dentro del área de cobertura de la femtocelda y durante toda la simulación permanecerán confinados dentro de la cobertura de la misma. En la Tabla 4 se muestra el conjunto de parámetros considerado para el despliegue femtocelular.

Parámetro	Valor
Duración del prefijo cíclico (T_{CP})	4,76 μ s
Periodo de scheduling (TTI)	1ms (14 símbolos OFDM)
Número de RBs	Depende del esquema de coordinación
Tamaño del RB	12 subportadoras durante 1 TTI
Subportadoras de datos por RB	120
Máxima potencia de transmisión femtocelda (P_T^{max})	20dBm
Ganancia de antena femtocelda (G_{TX})	5dB
Ganancia de antena terminal móvil (UE) (G_{RX})	0dB
Ganancia de diversidad transmisión (G_{Div_TX})	3dB
Ganancia de diversidad recepción (G_{Div_RX})	3dB
Patrón de antena horizontal femtocelda	Omnidireccional
Factor de ruido del receptor (F) en el UE	5dB
ARQ delay (\bullet_{ARQ})	6ms
Time between CQIs (T_{CQI})	1ms
CQI averaging time (W_{CQI})	4ms
CQI delay (\bullet_{CQI})	2ms

Tabla 4. Parámetros de simulación del despliegue femtocelular

3.2.2 Modelado explícito de la interferencia

Ya que el modelado de la interferencia es uno de los aspectos clave en el rendimiento de las redes heterogéneas, se ha considerado su modelado explícito. En concreto, se considera de forma explícita la interferencia provocada por las transmisiones de la macrocelda sobre los usuarios de las femtoceldas que están desplegadas en su zona de cobertura y los usuarios de las femtoceldas que están desplegadas en las macroceldas vecinas, considerando de nuevo las macroceldas vecinas como las macroceldas que forman el primer anillo.

Asimismo, para modelar la interferencia de las femtoceldas sobre las macroceldas se actúa de la misma manera. Se mide el nivel promedio de señal (interferencia) en cada RB procedente de cada femtocelda sobre los usuarios de la macrocelda sobre la que está desplegada y los usuarios de las macroceldas vecinas, considerando el primer anillo como en las otras situaciones. Por último, se modela la interferencia entre las femtoceldas para lo cual se mide el nivel de señal (interferencia) en cada RB procedente de cada femtocelda sobre los usuarios de las femtoceldas desplegadas en la misma macrocelda y de las femtoceldas desplegadas en las macroceldas vecinas.

3.2.3 Características de transmisión/recepción de las femtoceldas y los terminales móviles

En relación con las características técnicas de las femtoceldas hay que destacar que se ha optado por una antena omnidireccional. En cuanto a los parámetros, se define una ganancia de antena, G_{TX} . También se han considerado dos antenas transmisoras que suponen una ganancia en diversidad en transmisión, G_{Div_TX} . Los valores configurados para estos parámetros aparecen en la Tabla 4.

Los terminales móviles que se despliegan en las femtoceldas son exactamente los mismos que los desplegados en las macroceldas, ya que lo que se pretende en este tipo de redes heterogéneas es que un terminal sea capaz de conectarse tanto a macroceldas como a femtoceldas de forma transparente al usuario. De esta forma, en el punto 2.1.4.2 puede observarse una descripción de los terminales móviles y los valores concretos de los parámetros configurables aparecen en la Tabla 4.

3.2.4 Esquemas de gestión de recursos

De la misma forma que para el caso de las macroceldas todas las entidades relacionadas con la gestión de recursos están localizadas en la femtocelda y están controladas por el scheduling. Como ya se ha comentado las decisiones de scheduling tienen lugar cada TTI (1ms) y se realizan de forma independiente en cada femtocelda. Siguiendo en la misma línea que para el caso macrocelular, en este trabajo se ve la asignación de recursos como un problema multidimensional. Así, el esquema de coordinación de interferencias será el que determine qué recursos puede emplear cada femtocelda, para que después sea el scheduler el encargado de asignar los recursos a cada usuario. En primer lugar será la componente en el dominio temporal del scheduler la que determine el conjunto de usuarios, ordenados mediante una métrica, que son candidatos a recibir una asignación en ese TTI. En concreto la métrica utilizada será la estrategia retardo descrita en el punto 2.3.2. Para que posteriormente la componente en el dominio frecuencial se encargue de asignar los recursos concretos a esos usuarios en función de sus condiciones de canal.

3.2.4.1 Principios básicos de los esquemas de coordinación

Ya hemos visto en el punto 2.3.1 que se han empleado dos esquemas de coordinación de interferencias en la red macrocelular, que son FFR con sectorización en la subbanda exterior y FFR_{opa}. Debido a que FFR_{opa} presenta varias mejoras frente a FFR los esquemas de coordinación propuestos para la red femtocelular se han pensado para trabajar de forma conjunta con FFR_{opa}, aunque algunos de ellos también son válidos para trabajar con FFR. En los puntos 3.3 y 3.4 se explican los diferentes esquemas de coordinación propuestos en la femtocelda, para los dos tipos de despliegues de femtoceldas descritos con anterioridad, detallándose el reparto frecuencial y la asignación de potencia concreta que se llevan a cabo en cada uno de ellos.

Un aspecto común a todos los esquemas de coordinación propuestos para la femtocelda es que se lleva a cabo un ajuste adaptativo de la potencia, de tal forma que cada esquema de coordinación definirá su potencia media M_{med} que podrá ajustarse entre una potencia mínima (M_{min}) y una potencia máxima (M_{max}) en cada nivel de la máscara. La potencia mínima M_{min} se configura con un decremento de 3dB respecto a M_{med} y la potencia máxima M_{max} se configura con un incremento de 3dB respecto a M_{med} .

El algoritmo de adaptación de potencia que se emplea es el mismo que para el esquema FFR_{opa} y está explicado en detalle en el punto 2.3.1.4. Otro aspecto común a todos los esquemas es que se emplea una adaptación de tasa en función de las medidas de calidad del enlace, con lo que las femtoceldas definen una MCS objetivo del usuario k , que es la MCS más baja que le permite transmitir su tasa requerida por TTI ($T_{req,k}$) en el menor número de RBs n_k (asumiéndose $n_k = 1$). La tasa requerida se corresponde con la transmisión de los TUs que constituyen cada paquete de datos en un RB. La asignación de recursos se realiza inicialmente con esta MCS objetivo, aunque si las condiciones de canal no permiten la asignación del usuario con una potencia dada, se intentará asignarle una MCS más baja ocupando un mayor número de RBs.

Además cabe destacar también dos aspectos que caracterizan a todos los esquemas y que son también comunes con FFR y FFR_{opa}. El primer aspecto consiste en que a la hora de

asignar recursos adicionales en primer lugar se intenta mejorar la MCS de todos los RBs asignados previamente al usuario y si esta mejora no es posible se asigna un RB adicional, con la misma MCS que los RBs previamente asignados. El segundo aspecto es que después de realizar una asignación se vuelven a calcular las prioridades, según el scheduler temporal, de todos los usuarios para posteriormente reordenar los usuarios y escoger al usuario más prioritario para la nueva asignación.

3.2.4.2 Descripción de los algoritmos de scheduling frecuencial

Se han implementado varios algoritmos de scheduling frecuencial para llevar a cabo diferentes pruebas. Como ya se ha comentado el scheduling debe tener en cuenta las restricciones que impone el esquema de coordinación de interferencias, por lo tanto en este apartado se va a explicar el algoritmo de scheduling frecuencial básico y cuando se expliquen los diferentes esquemas de coordinación de interferencias propuestos se describirán también los aspectos que afectan al scheduling básico. El scheduling empleado en las femtoceldas es bastante similar a los dos algoritmos de scheduling frecuencial empleados en las macroceldas pero adaptado a las restricciones impuestas por las femtoceldas.

Los principales pasos que se llevan a cabo en el algoritmo de scheduling básico implementado para las femtoceldas son los siguientes:

- 1) Se ordenan las conexiones activas que tengan almacenados paquetes en los buffers de acuerdo al scheduling temporal y se determina la MCS objetivo para cada conexión k , MCS_k .
- 2) Siguiendo el orden de prioridad marcado por el scheduling temporal y mientras existan RBs libres se intenta asignar a la conexión más prioritaria. Vamos a suponer que la conexión más prioritaria es la conexión k , pudiéndose dar dos situaciones:
 - a. Si la conexión no ha recibido ninguna asignación en este TTI se intentan asignar $n_{RB,k}$ RBs libres consecutivos en el grupo de RBs prioritarios (Las femtoceldas podrán asignar a sus usuarios en un determinado grupo de RBs y una parte de esos RBs los consideraremos prioritarios y el resto los consideraremos secundarios), llevando a cabo renegociación si fuese necesario. Si la asignación es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si la asignación no ha sido posible, se intenta asignar al usuario en el grupo de RBs secundarios, incluyendo renegociación si fuese necesario. Si la asignación tampoco es posible en el grupo de RBs secundarios, se asume que el usuario requiere un RB más ($n_{RB,k} = n_{RB,k} + 1$) y de esta forma una MCS más baja con unos requisitos de SINR menores. Este proceso de asignar un RB más se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la nueva MCS objetivo es la MCS más baja. En el momento en el que el usuario no puede recibir asignación y su MCS es la más baja del sistema se vuelve al paso 2 con la conexión $k+1$.
 - b. Si la conexión ya ha recibido una asignación previa en este TTI se intenta aumentar la MCS. Hay que tener en cuenta que el usuario debe cumplir los requisitos de SINR de la nueva MCS en todos los RBs asignados previamente y que la tasa total cursada con la nueva MCS no puede exceder el número de TUs que el usuario tiene en los buffers. Si el aumento de MCS es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si

el aumento de MCS no es posible se asigna un RB adicional utilizando la MCS asignada previamente. Primero se intentará asignar ese RB adicional en el grupo de RBs prioritarios, aplicando renegociación si fuese necesario. Si no ha sido posible realizar la asignación en el grupo de RBs prioritarios se intentaría asignar el RB en el grupo de RBs secundarios aplicando de nuevo renegociación si fuese necesario. Si la asignación del RB adicional es posible, se acepta la asignación, se recalcula la prioridad para todas las conexiones, se reordena la lista de conexiones activas y se vuelve al paso 2. Si la asignación no ha sido posible, se disminuye la cantidad de datos que se pretendía transmitir en un TU, disminuyéndose de esta forma la MCS deseada en todos los RBs e intentando la nueva asignación. Este proceso de disminuir un TU se lleva a cabo hasta que la asignación es posible o hasta que la tasa que se lograría transmitir con el RB adicional sea igual o menor a la que tenía asignada el usuario con la asignación previa.

- 3) Si la potencia asignada supera la potencia máxima que puede transmitir la femtocelda se procede a ajustar la potencia. Como ya se ha comentado en la explicación del algoritmo FFRopa se extraerá más potencia de aquellos usuarios que posean un mayor margen de potencia.
- 4) Finalmente se intenta mejorar la MCS asignada en todos los RBs de aquellas conexiones que aun tienen paquetes en sus buffers y cuya tasa asignada no supere la tasa requerida por TTI (R_k).

3.3 Despliegue de una femtocelda en cada macrocelda

Con este despliegue se pretende comprobar el efecto que tiene sobre las prestaciones de la red el despliegue de femtoceldas que emplean los mismos recursos frecuenciales que las macroceldas sobre las que son desplegadas. Se han considerado diversos esquemas de coordinación que se incluyen en los siguientes subapartados, condicionados a la posición de la femtocelda. En concreto, se consideran las siguientes posiciones:

- Zona interior de la macrocelda: La femtocelda se coloca a una distancia de 400m y con un ángulo de 0° respecto al eje horizontal (Figura 16.a)).
- Zona exterior de la macrocelda: La femtocelda se coloca a una distancia de 750m y con un ángulo de 0° respecto al eje horizontal (Figura 16.b)).
- Dirección de máxima radiación del sector: La femtocelda se coloca en un ángulo de $\pi/6$, de tal forma que está situada en la dirección de máxima radiación de la antena del sector 0 de la macrocelda. Se han realizado pruebas tanto en la zona interior (400m) como en la zona exterior (750m) (Figura 16.c)).
- Zona de frontera entre sectores: La femtocelda se coloca en un ángulo de $-\pi/6$, de tal forma que está situada en la frontera entre el sector 0 y el sector 2 de la macrocelda. Se han llevado a cabo pruebas tanto en la zona interior (400m) como en la zona exterior (750m) (Figura 16.d)).

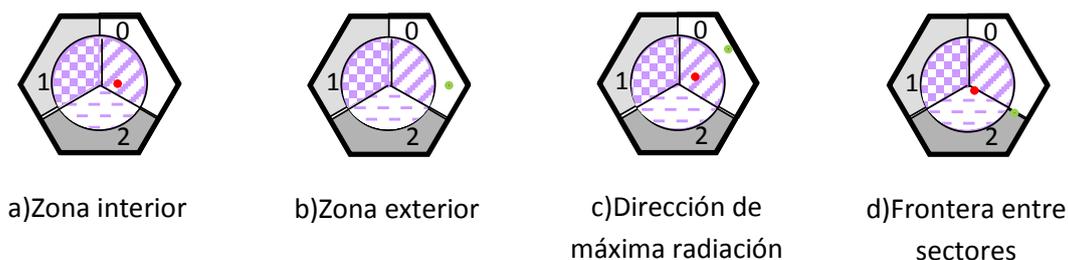


Figura 16. Posiciones de las femtoceldas

Merece la pena recordar que para el esquema FFRopa de las macroceldas el reparto frecuencial es el siguiente: de los 27 RBs que dispone la red, 18 RBs se reservan para la zona interior (se preasignan 6 RBs a cada uno de los sectores) y los otros 9 para la zona exterior (3 RBs para cada sector). En lo que se refiere a la potencia de transmisión de la femtocelda, ésta se ha calculado considerando un reparto uniforme de la potencia máxima de transmisión (20dBm) entre el número de RBs disponibles en cada caso.

3.3.1 Esquema de coordinación 1

El esquema de coordinación 1 está pensado para femtoceldas desplegadas en la zona interior de la macrocelda (ángulo 0 o $\pi/6$) y consiste en que las femtoceldas pueden emplear los RBs reservados a la zona exterior de los dos sectores en los que no está desplegada. De esta forma las femtoceldas pueden emplear 6 RB, tal y como se ilustra en la Figura 17.a). Como la potencia máxima de transmisión es de 20dBm, si la repartimos entre los 6RB, se puede utilizar una potencia media de transmisión por RB (M_{med}) de 12dBm. Respecto al scheduling frecuencial los 6 RBs se consideran prioritarios.

3.3.2 Esquema de coordinación 2

El segundo esquema de coordinación también está pensado para femtoceldas desplegadas en la zona interior (ángulo 0 o $\pi/6$) y en este caso las femtoceldas pueden emplear los RBs reservados para la zona exterior de los dos sectores en los que no está desplegada y además 4 RBs de la zona interior preasignados a los otros dos sectores. Concretamente se escogen dos RBs de cada sector y se eligen los dos RBs que el sector va a utilizar en último lugar teniendo en cuenta el ordenamiento en la asignación que lleva a cabo FFRopa. Por ejemplo, tal y como se ilustra en la Figura 17.b), si consideramos que la femtocelda en cuestión está desplegada en el sector 0 de la macrocelda 0, escogerá los dos RBs de la zona interior que emplearán en último lugar los sectores 1 y 2. El sector 0 tendrá preasignados los RBs del 0 al 5, el sector 1 del 6 al 11 y el sector 2 del 12 al 17. Por lo tanto escogerá los RBs 10 y 11 del sector 1 y los RBs 16 y 17 del sector 2.

De esta forma cada femtocelda dispone de 10 RBs para asignar a sus usuarios. Como puede emplear 10 RBs la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) es de 10dBm. En cuanto al scheduling frecuencial se consideran los 10 RBs como prioritarios.

3.3.3 Esquema de coordinación 3

Este esquema está propuesto para las femtoceldas desplegadas en el exterior (ángulo 0 o $\pi/6$) y está basado en que las femtoceldas pueden emplear los RBs de la subbanda exterior de los dos sectores en los que no está desplegada y además pueden emplear los RBs de la

subbanda interior preasignados a los dos sectores en los que no está desplegada, por lo tanto las femtoceldas tienen disponibles 18 RBs para realizar las asignaciones de sus usuarios, tal y como aparece en la Figura 17.c). Estos 18 RBs se consideran todos prioritarios y la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha ajustado a 7dBm.

3.3.4 Esquema de coordinación 4

Este esquema de coordinación está pensado para las femtoceldas desplegadas tanto en el interior como en el exterior (ángulo 0 o $\pi/6$). Consiste en que la femtocelda puede emplear los RBs del exterior de los sectores en los que no está desplegada además de todos los RBs de la subbanda interior, de tal forma que cada femtocelda puede emplear un total de 24 RBs (Figura 17.d)). Se consideran los 24 RBs como prioritarios y la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha ajustado a 6dBm.

3.3.5 Esquema de coordinación 5

El esquema de coordinación 5 está pensado para femtoceldas desplegadas en el interior y en la frontera entre dos sectores (ángulo $-\pi/6$), de tal forma que las femtoceldas pueden emplear los 3 RBs de la zona exterior del sector situado enfrente, tal y como se ilustra en la Figura 17.f). De esta forma si la femtocelda se encuentra situada en la frontera entre el sector 0 y el sector 2, solo empleará los 3 RBs exteriores del sector 1. Se consideran los 3 RBs como prioritarios y la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se configura en 15dBm.

3.3.6 Esquema de coordinación 6

Este esquema está pensado para femtoceldas desplegadas en la frontera entre dos sectores (ángulo $-\pi/6$), tanto para la zona interior como la exterior. Este esquema consiste en que las femtoceldas pueden emplear todos los RBs de la subbanda interior y los 3 RBs de la zona exterior del sector situado enfrente (Figura 17.g)). Por lo tanto las femtoceldas pueden asignar a sus usuarios en un total de 21 RBs los cuales se consideran todos RBs prioritarios. La potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha configurado en 6dBm.

3.3.7 Esquema de coordinación 7

El esquema de coordinación 7 se ha pensado para las femtoceldas situadas en el exterior y en la dirección de máxima radiación del sector (ángulo $\pi/6$). En esta propuesta las femtoceldas pueden emplear los RBs de la zona interior preasignados a los dos sectores en los que no está desplegada la femtocelda, pudiendo por lo tanto emplear 12 RBs (Figura 17.e)). Estos 12 RBs se consideran como RBs prioritarios y la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha ajustado a 9dBm. No está permitido asignar los RBs del exterior de los dos sectores adyacentes para limitar la interferencia sobre los usuarios que se sitúan en los mismos en la celda adyacente.

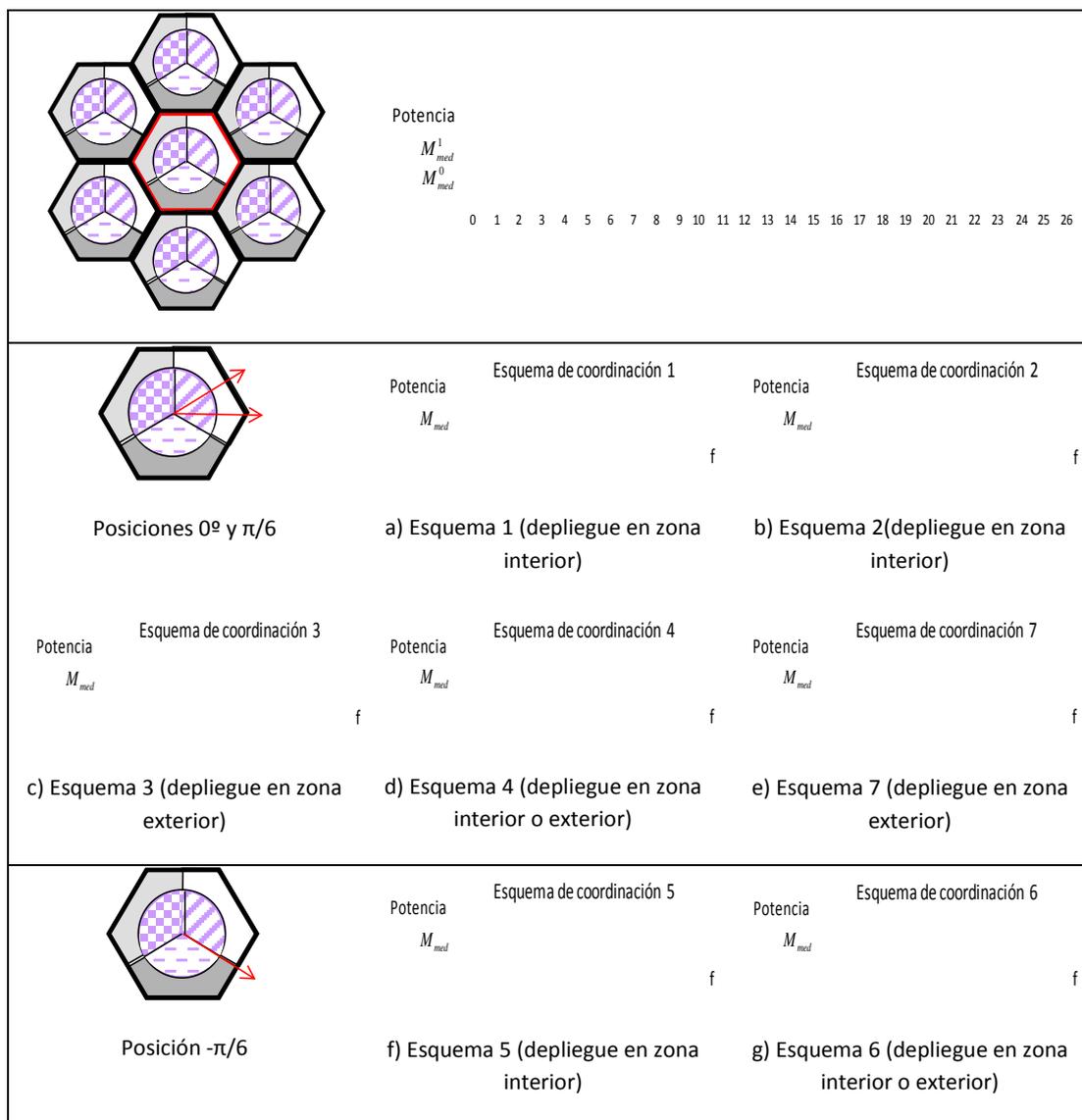


Figura 17. Esquemas de coordinación propuestos para las femtoceldas

3.4 Despliegue de una rejilla 3x3

Este escenario consiste en desplegar en la macrocelda 0 la rejilla 3x3 definida en el punto 3.2.1, situando la femtocelda justo en el centro del cuadrado. La posición de la rejilla puede configurarse mediante la distancia y el ángulo respecto al centro de la macrocelda. De la misma forma que para el otro tipo de despliegue, se han considerado diferentes esquemas de coordinación, adaptados al despliegue de la rejilla en diferentes posiciones:

- Zona interior de la macrocelda: La rejilla se coloca a una distancia de 400m y con un ángulo de 0° respecto al eje horizontal.
- Zona exterior de la macrocelda: La rejilla se coloca a una distancia de 750m y con un ángulo de 0° respecto al eje horizontal.
- Dirección de máxima radiación del sector: La rejilla se coloca en un ángulo de $\pi/6$. Se han realizado pruebas tanto en la zona interior (400m) como en la zona exterior (750m).
- Zona de frontera entre sectores: La rejilla se coloca en un ángulo de $-\pi/6$. Se han llevado a cabo pruebas tanto en la zona interior (400m) como en la zona exterior (750m).

A diferencia del despliegue anterior, la potencia de transmisión por RB en la femtocelda, no se corresponde con un reparto uniforme de la potencia máxima entre los distintos RBs accesibles. Por el contrario, la potencia se ajusta para limitar la interferencia co-layer.

3.4.1 Esquemas sin coordinación entre femtoceldas.

Los esquemas que se describen a continuación, propuestos a efectos comparativos, no consideran coordinación de recursos entre las femtoceldas de la rejilla, aunque si la coordinación distribuida no cooperativa con las macroceldas, con planteamientos similares a los descritos para el escenario con una sola femtocelda. La potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha ajustado a 7dBm. Este nivel permite el acceso sobre un máximo de 18RBs, sin sobrepasar la potencia máxima de transmisión de la femtocelda. Aunque es cierto, que en los esquemas 8 y 9 la potencia podría ser mayor, un barrido de potencia realizado en las simulaciones muestra que las prestaciones permanecen invariantes ante una variación de la potencia de transmisión, ya que si se aumenta la potencia de transmisión, la interferencia generada por las femtoceldas vecinas aumenta en el mismo nivel y si por el contrario se disminuye la potencia, también se disminuye la interferencia. En definitiva, se puede disminuir la potencia siempre y cuando sea suficiente para alcanzar los límites de la cobertura de la femtocelda, reduciendo así la interferencia sobre la macrocelda.

3.4.1.1 Esquema de coordinación 8

Este esquema de coordinación está pensado para desplegar la rejilla en la zona interior de la macrocelda (ángulo 0). Las femtoceldas pueden emplear los RBs de la subbanda exterior de los dos sectores en los que no está situada la rejilla. De esta forma las 9 femtoceldas que forman el escenario pueden emplear 6 RBs. Hay que destacar que todas las femtoceldas emplean los mismos 6 RBs, considerándolos todos prioritarios.

3.4.1.2 Esquema de coordinación 9

Esta propuesta está pensada para desplegar la rejilla en el exterior de la macrocelda (ángulo 0) y se basa en que las femtoceldas de la rejilla pueden emplear los RBs de la subbanda exterior asignados a los dos sectores en los que no está desplegada la rejilla además de los 6 RBs de la subbanda interior preasignados al sector en el que está desplegada la rejilla. Por lo tanto las femtoceldas pueden emplear 12 RBs, considerándolos todos prioritarios.

3.4.1.3 Esquema de coordinación 10

El esquema 10 se propuso para desplegar la rejilla en el exterior de la macrocelda (ángulo 0) y consiste en que las femtoceldas pueden utilizar tanto los RBs de la subbanda exterior como los de la interior de los dos sectores sobre los que no está desplegada la rejilla, de tal forma que las femtoceldas tienen a su disposición 18 RBs, los cuales se consideran todos prioritarios.

3.4.2 Esquemas con coordinación entre femtoceldas

Al igual que en los esquemas anteriores, la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) se ha ajustado a 7dBm, salvo que se especifique lo contrario.

3.4.2.1 Esquema de coordinación 11

Este esquema se ha propuesto para los despliegues de la rejilla en la zona exterior de la macrocelda (ángulo 0). El ancho de banda disponible para las femtoceldas está compuesto por 18 RBs, que son los RBs exteriores e interiores de los dos sectores en los que no está desplegada la rejilla. Sin embargo cada femtocelda solo va a poder emplear 6 RBs. Adicionalmente, el scheduler de la femtocelda, asignará los RBs dependiendo de la posición del usuario dentro de la cobertura de la femtocelda. Es cierto que el diagrama de radiación de la antena es omnidireccional, no obstante, al limitar la zona en la que se sitúa el usuario que recibe cada RB, el objetivo es minimizar la interferencia recibida. En la Figura 18 podemos observar la distribución propuesta en este esquema para el caso concreto de que la rejilla esté desplegada en el sector 0. Vemos que cada femtocelda tiene 3 RBs reservados para los usuarios situados en la parte superior y otros 3 RBs para la parte inferior, de tal forma que el scheduler intentará asignar al usuario en los 3 RBs que correspondan a su femtocelda y a su zona (superior o inferior). De esta forma se intenta separar lo máximo posible las frecuencias que son reutilizadas intentando minimizar las interferencias. Aunque también estamos limitando la diversidad frecuencial ya que un usuario solo puede acceder a 3 RBs y si no puede ser asignado en esos 3 RBs no recibirá ninguna asignación.

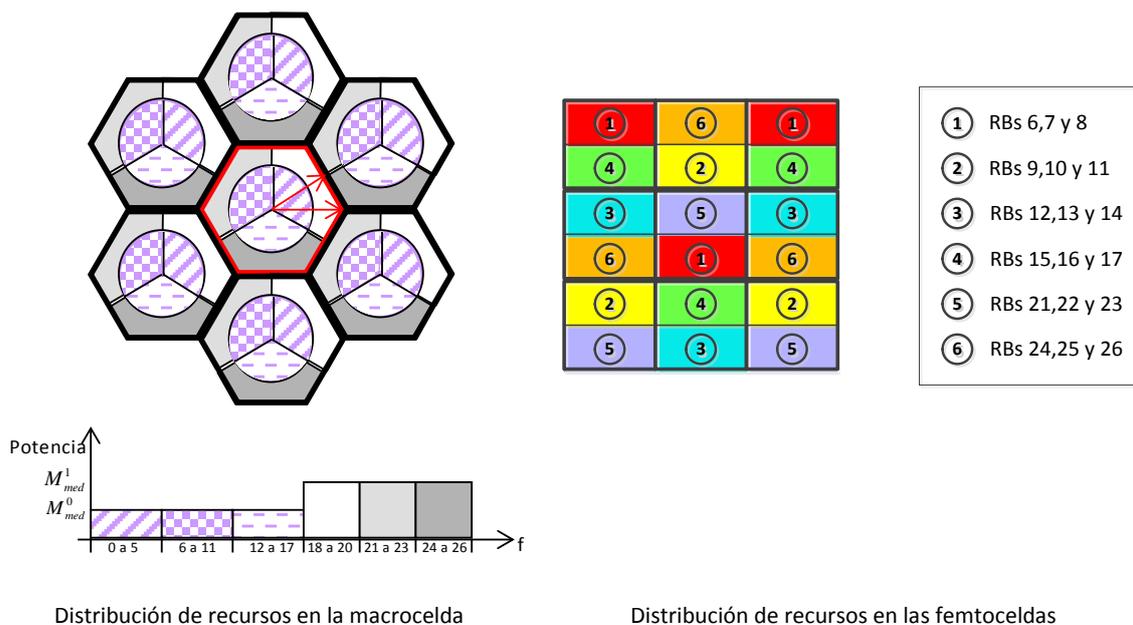


Figura 18. Distribución frecuencial del esquema de coordinación 11

3.4.2.2 Esquema de coordinación 12

Este esquema también está pensado para despliegues donde la rejilla esté colocada en la zona exterior de la macrocelda (ángulo 0) y es una modificación del esquema 11. De tal forma que el ancho de banda disponible para las femtoceldas siguen siendo 18 RBs, los cuales son los RBs de la zona exterior e interior de los sectores en los que no está desplegada la rejilla. La principal modificación es que en este caso las femtoceldas pueden emplear los 18 RBs, pero de tal forma que los 6RBs asignados en la Figura 18 son los RBs prioritarios de cada femtocelda, y los 12 restantes forman el grupo de RBs secundarios, por lo tanto el scheduler intentará asignar a sus usuarios en los 6 RBs marcados en la distribución de la Figura 18 y si no

es posible los intentará asignar en los 12 RBs restantes. Tal y como se verá en el capítulo de resultados, dado que la ganancia en la calidad de la señal recibida debido al control de interferencias no compensa las pérdidas provocadas por la disminución de la flexibilidad en la asignación de RBs dentro de la femtocelda, en este esquema ya no se diferencia si un usuario está en la parte superior o inferior de la femtocelda, así que todos los RBs son accesibles independientemente de la zona en la que se encuentre el usuario.

3.4.2.3 Esquema de coordinación 13

Este esquema es similar al 12 y por lo tanto pensado para despliegues donde la rejilla esté colocada en la zona exterior de la macrocelda (ángulo 0 o $\pi/6$), pero añadiendo la utilización de dos niveles en la máscara de potencia, de tal forma que los 6 RBs asignados según la distribución de la Figura 18 serán los RBs prioritarios y serán los RBs destinados a la zona exterior. Mientras que los 12 RBs restantes formarán el grupo de RBs secundarios y serán los destinados a la zona interior. En los RBs exteriores se transmitirá con una potencia media por RB (M_{med}^1) de 8dBm. En los RBs interiores la potencia es fija y se ha ajustado a 3dBm por RB.

En este esquema de coordinación también se han realizado pruebas dejando la potencia de transmisión de los RBs exteriores fija y por lo tanto eliminando el ajuste adaptativo de potencia. A estas pruebas nos referiremos mediante el nombre esquema de coordinación 13 con potencias fijas.

3.4.2.4 Esquema de coordinación 14

Este esquema se ha pensado para despliegues de la rejilla tanto en la zona interior como exterior de la macrocelda (ángulo 0 o $\pi/6$). Las femtoceldas disponen de todos los RBs de la subbanda reservada a la zona interior y además los 6 RBs exteriores de los dos sectores en los que no está desplegada la rejilla (que se considerarán prioritarios en el conjunto de la rejilla), por lo que las femtoceldas disponen de 24 RBs. En el caso de que la rejilla se despliegue en el interior de la celda, es de esperar que el nivel de interferencia en los RBs del interior que comparten con la macrocelda sea elevado. No obstante, el propósito de este esquema es evaluar el equilibrio entre la ganancia obtenida al aumentar la disponibilidad de RBs y la pérdida provocada por el potencial incremento en los niveles de interferencia soportados. El esquema trata de aproximar una distribución ortogonal de los RBs del exterior (de la macrocelda y sectores opuestos) entre las femtoceldas (en un cluster de 4), reservando dichos RBs para el exterior de cada femtocelda. En la Figura 19 se muestran los 2 RBs del exterior (que se considerarán además como prioritarios) en cada una de las femtoceldas para el caso concreto en el que la rejilla se coloque en el sector 0. Los 22 RBs restantes forman el grupo de RBs secundarios. En este esquema también se aplican dos niveles en la máscara de potencia de tal forma que en los 2RBs exteriores se transmite con una potencia media por RB (M_{med}^1) de 12dBm. Y en los RBs secundarios se transmite con una potencia constante por RB de 4dBm.

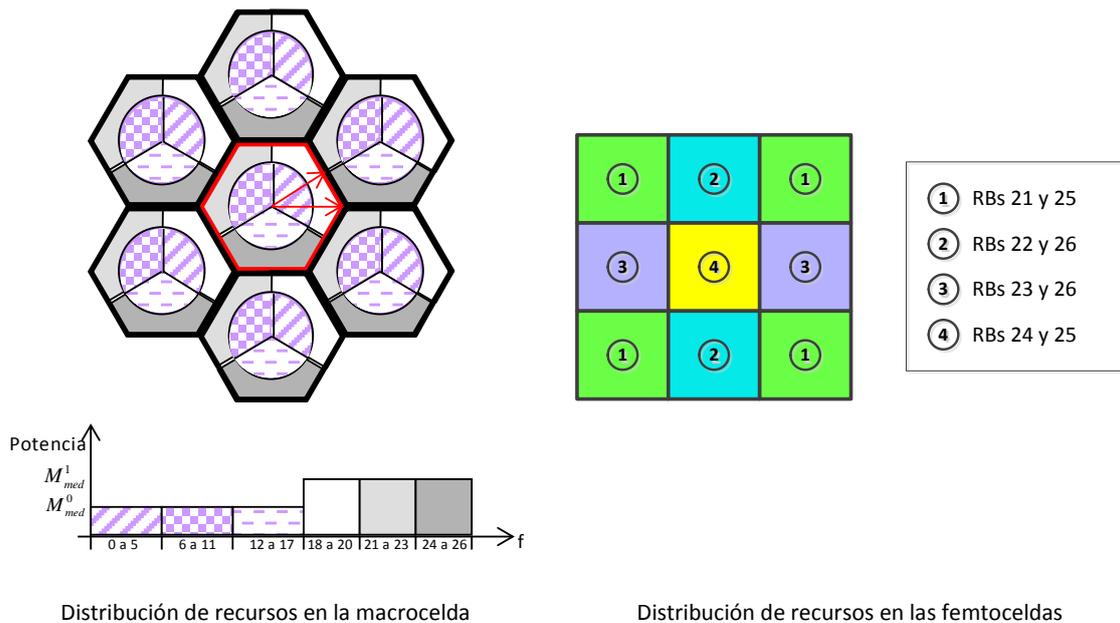


Figura 19. Distribución de los RBs prioritarios en el esquema de coordinación 14

Existe una variante de este esquema de coordinación pensada para despliegues de la rejilla en la zona interior de la macrocelda y que consiste en que las femtoceldas pueden emplear los RBs exteriores de los dos sectores en los que no están desplegadas y además 2 RBs de la zona interior de estos dos sectores, escogiendo los 2RBs que emplearan en último lugar los sectores. Por lo tanto cada femtocelda dispone de 10 RBs, de los cuales forman el grupo de RBs prioritarios los 2 RBs marcados en la Figura 19 y además son los reservados para la zona exterior con una potencia de transmisión por RB (M_{med}^1) de 12dBm. Los 8 RBs restantes se consideran secundarios y reservados a la zona interior con una potencia de transmisión por RB fija de 5dBm.

3.4.2.5 Esquema de coordinación 15

Al igual que en el esquema 14, se ha planteado para el despliegue de la rejilla en la zona interior de la macrocelda (ángulo 0). Igual que en el esquema 14, las femtoceldas tienen a su disposición todos los RBs de la subbanda interior y además los 6 RBs exteriores de los dos sectores en los que no está desplegada, así que disponen de un total de 24 RBs. No obstante, en el conjunto de la rejilla, además de los 6 RBs exteriores de los dos sectores en los que no está desplegada, se consideran como asignables para el exterior (con potencia de transmisión mayor) los 2RBs de la subbanda interior preasignada a cada uno de los otros dos sectores, escogiendo concretamente los que emplearán en último lugar dichos sectores. Es decir, el conjunto de RBs exteriores es 10. Al aumentar el número de RBs exteriores en el conjunto de la rejilla, es posible mejorar la ortogonalidad del esquema de reparto de éstos entre las femtoceldas, con respecto al reparto propuesto en el esquema 14. Así, cada femtocelda dispone de los 2 RBs exteriores (prioritarios) que son los indicados en la Figura 20 (para el caso de desplegar la rejilla en el sector 0) y en los que la potencia de transmisión media por RB (M_{med}^1) es de 12dBm. Los 22 RBs restantes se reservan para el interior y se transmite con una potencia fija por RB de 4dBm. De entre esos 22 RBs, en cada femtocelda se establece como prioritaria la asignación de recursos sobre los RBs pertenecientes al conjunto global de

exteriores de la rejilla (los 10 RBs mencionados anteriormente), que no han sido definidos como exteriores en la correspondiente femtocelda. El resto se consideran secundarios.

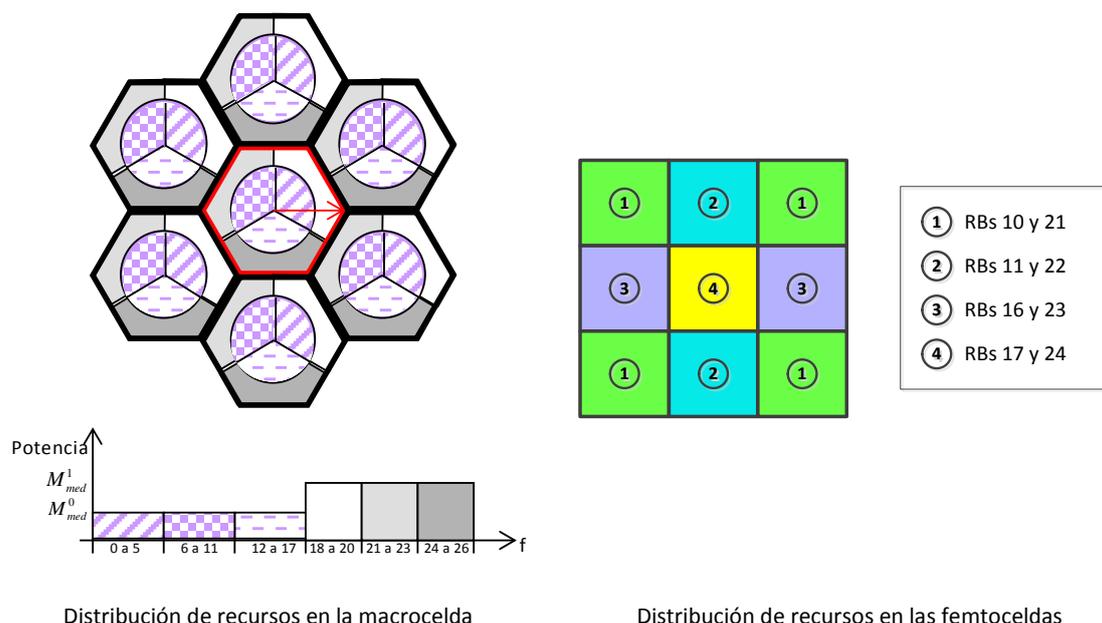


Figura 20. Distribución de los RBs exteriores en el esquema de coordinación 15

3.4.2.6 Esquema de coordinación 16

Este esquema de coordinación está pensado para despliegues de la rejilla en la frontera entre dos sectores (ángulo $-\pi/6$), ya sea en la zona interior como en la exterior. Es un esquema muy similar al 14 pero adaptado a la frontera. Si por ejemplo la rejilla se despliega en la frontera entre los sectores 0 y 2, de tal forma que la primera línea de la rejilla está en el sector 0, la línea central justo en la frontera y la tercera línea en el sector 2, los RBs que se consideran prioritarios y además exteriores son los indicados en la Figura 21. Hay que tener en cuenta que todas las femtoceldas tienen acceso a todos los RBs de la subbanda interior y además a los RBs exteriores de los sectores en los que no están desplegadas. Por lo tanto siguiendo con el ejemplo la primera línea podrá acceder a los RBs exteriores de los sectores 1 y 2, la línea central podrá utilizar los RBs exteriores del sector 1 y la tercera línea podrá acceder a los RBs exteriores de los sectores 0 y 1. De tal forma que la primera y tercera línea de femtoceldas puede emplear un total de 24 RBs, mientras que la línea central solo puede acceder a un total de 21 RBs.

Los 2 RBs indicados para cada femtocelda en la Figura 21 forman el grupo de RBs prioritarios y además son los RBs considerados para la zona exterior con una potencia de transmisión por RB (M_{med}^1) de 12dBm. Los RBs restantes forman el grupo de RBs secundarios y de la zona interior con una potencia de transmisión fija de 4dBm.

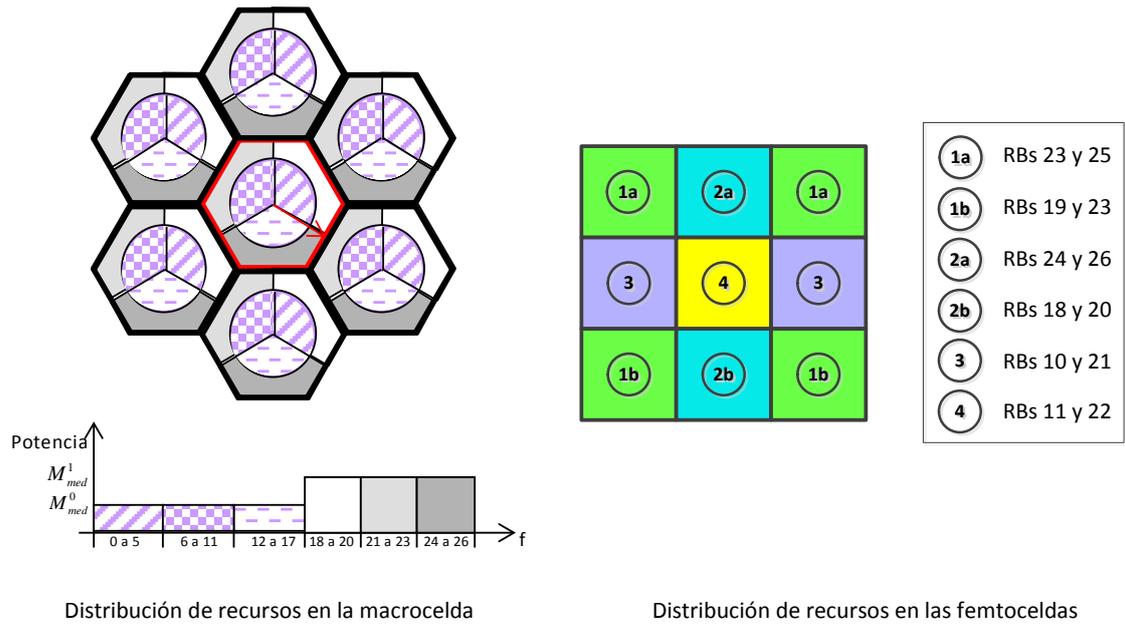


Figura 21. Distribución de los RBs prioritarios del esquema de coordinación 16

4. Resultados

En este punto se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones de los diferentes esquemas de coordinación de interferencias propuestos para ambos tipos de despliegues femtocelulares.

4.1 Despliegue de una femtocelda en cada macrocelda

En primer lugar vamos a comenzar analizando los resultados obtenidos para el escenario en el que se despliega la femtocelda en la zona interior (ángulo 0) y para un total de 81 usuarios en cada macrocelda. En las gráficas mostradas en la Figura 22 aparece representada la probabilidad de descarte de paquetes en función del número de usuarios existentes en cada femtocelda. En lugar de indicar directamente el número de usuarios de cada femtocelda se ha considerado indicar el porcentaje de usuarios de la macrocelda con el que se corresponde. Esto es, si se indica el 80% y en la macrocelda hay 81 usuarios, en la femtocelda habrá el 80% de 81, que redondeando siempre al entero inferior serían 64 usuarios.

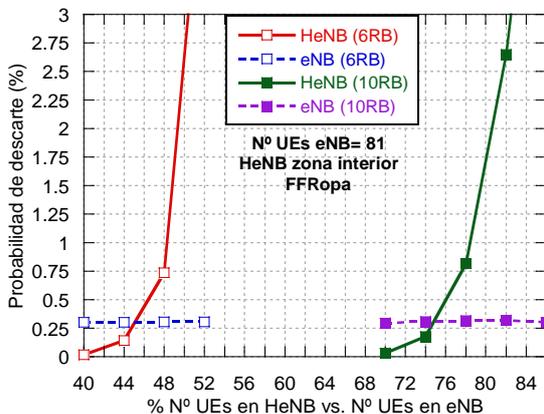
En la Gráfica a) de la Figura 22 se representan los esquemas de coordinación 1 y 2, que se corresponden fundamentalmente con que las femtoceldas pueden emplear 6 y 10 RBs respectivamente, aplicados sobre una macrocelda en la que se implementa el algoritmo de coordinación FFRopa. Podemos comprobar que la probabilidad de descarte de las macroceldas se mantiene constante entorno a 0.3 para ambos esquemas mientras que la probabilidad de descarte de las femtoceldas es mucho mayor para el esquema en el que se pueden emplear 6 RBs. Esto nos indica que el factor limitante de cara a maximizar el número de usuarios que puede servir la femtocelda es el número de RBs disponibles, ya que pasando de 6 RBs a 10 RBs aumentamos considerablemente la capacidad de las femtoceldas, a la vez que no se degradan las prestaciones de las macroceldas por el hecho de compartir la disponibilidad de acceso sobre los RBs adicionales. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que al aplicar el esquema FFRopa esos 4RBs serán aquellos que se ocupen con menor probabilidad por parte de la macrocelda en el sector en el que se sitúa la femtocelda. Podemos observar el hecho de que aunque en el esquema de coordinación 2 se disminuya la potencia de transmisión al emplear más RBs sigue siendo suficiente para alcanzar los límites de la femtocelda.

Hay que destacar que debido a que los usuarios están relativamente cerca de las femtoceldas, se pueden emplear MCSs altas posibilitando servir a un gran número de usuarios. Gracias a esto la femtocelda es capaz de servir con una probabilidad de descarte de paquetes inferior al 1% a un máximo de aproximadamente 63 usuarios (78%) con tan solo 10 RBs disponibles. Siguiendo con el mismo planteamiento y considerando FFRopa como mecanismos de ICIC en la macrocelda, podemos observar la gráfica 22.c) en la que se representa el esquema 4 que permite a las femtoceldas utilizar 24 RBs. Vemos que con 24 RBs, aunque la potencia de transmisión de las femtoceldas se ha disminuido bastante frente a los dos casos anteriores, podemos dar servicio a una gran cantidad de usuarios, concretamente a un máximo de unos 126 usuarios. Como se ha comentado antes, la cercanía de los usuarios con la femtocelda permite emplear las MCSs más eficientes aumentando mucho la capacidad. Por otra parte, la posible degradación en la calidad de las transmisiones como consecuencia de posibles interferencias sufridas en los RBs que se corresponden con la subbanda interior de la

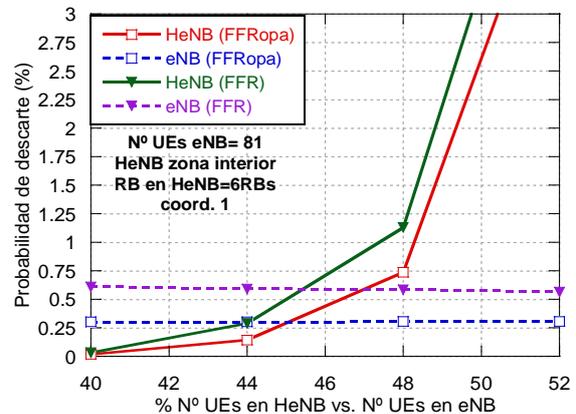
macrocelda, se ve ampliamente compensada por la ganancia que supone una mayor disponibilidad en RBs en la femtocelda.

Por lo tanto podemos concluir que lo más beneficioso es permitir que las femtoceldas puedan emplear cuantos más RBs mejor, ya que la cercanía de los usuarios permite emplear MCSs muy eficientes dando servicio a gran cantidad de usuarios, mientras las bajas potencias de transmisión de las femtoceldas no degradan en exceso las prestaciones de los usuarios de las macroceldas.

En las Gráficas 22.b) y 22.d) podemos observar las prestaciones de los esquemas 1 y 4 respectivamente cuando se emplea FFR en lugar de FFRopa en la red macrocelular. Como ya se mencionó en el punto 2.3.1 el esquema FFRopa mejora el esquema FFR fundamentalmente en dos aspectos que son: reducir la variabilidad en la subbanda interior y realizar un ajuste adaptativo de la potencia. Estas mejoras hacen que el descarte de paquetes de los usuarios de la macrocelda sea mayor cuando se emplea FFR que cuando se emplea FFRopa. En cuanto a las prestaciones de las femtoceldas, vemos que el comportamiento es muy similar para el caso del esquema 1 aunque puede apreciarse una pequeña degradación por el hecho de emplear FFR. Sin embargo para el esquema 4 se produce una reducción considerable de la capacidad de las femtoceldas al emplear FFR en lugar de FFRopa. Esto es debido a que en el esquema 4 las femtoceldas pueden emplear 24 RBs de los cuales forman parte los 18 RBs de la subbanda interior de la macrocelda, con lo que la mayor variabilidad de la interferencia en la zona interior de la macrocelda al emplear FFR provoca esta degradación de las prestaciones. Hay que tener en cuenta que al aplicar FFRopa, la femtocelda puede organizar sus transmisiones sobre 4 o 12 RBs del interior, asignados prioritariamente a usuarios macro de sectores opuestos al suyo y por tanto, sobre los que el nivel de interferencia es menor.



a) Esquema 1 vs. Esquema 2



b) Esquema 1: FFRopa vs. FFR

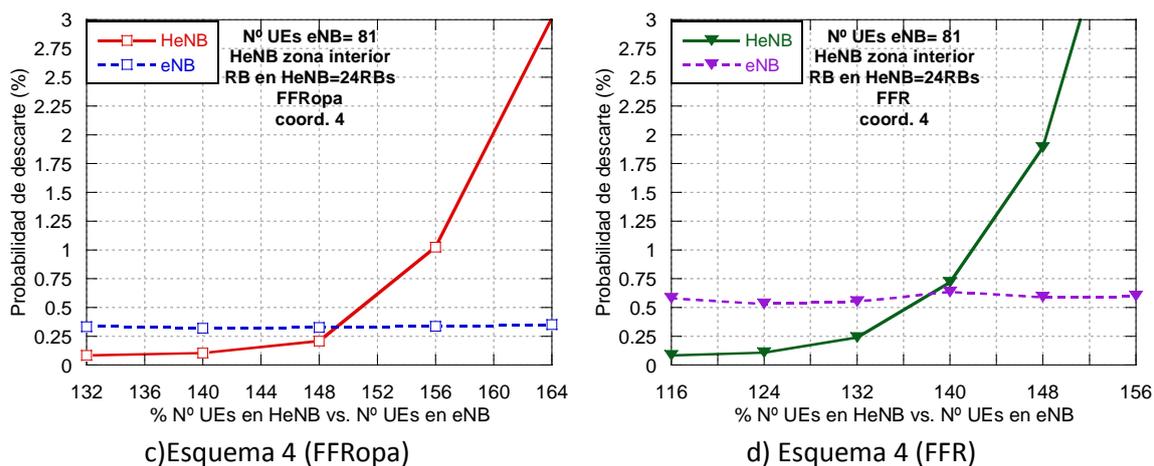
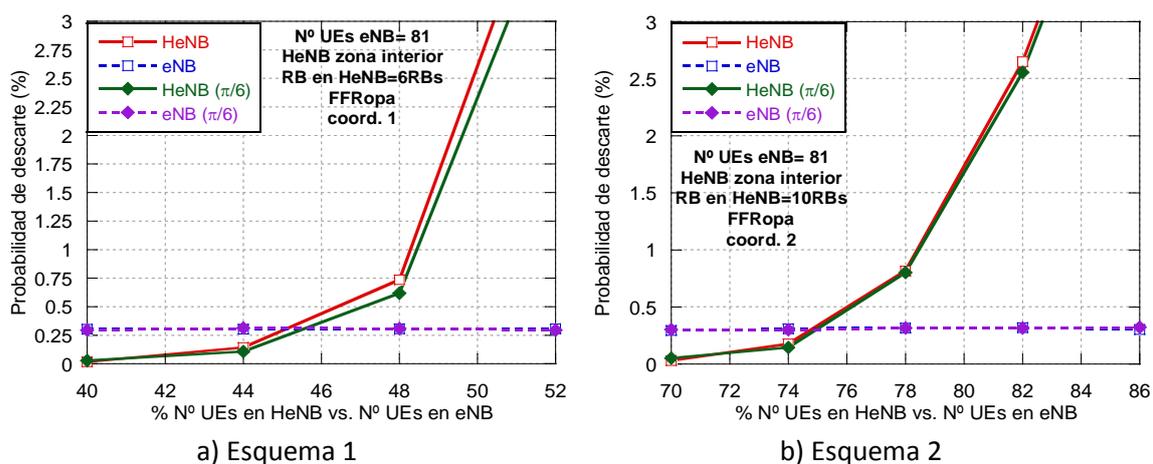
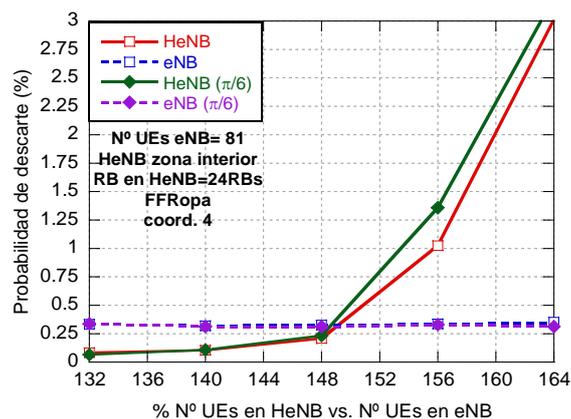


Figura 22. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior

En las gráficas de la Figura 23 podemos observar la probabilidad de descarte para algunos de los esquemas de coordinación propuestos pero para el escenario en el que las femtoceldas son desplegadas en un ángulo igual $\pi/6$, de tal forma que están desplegadas en la dirección de máxima radiación del sector 0, comparadas con la situación anterior, en la que están desplegadas en un ángulo igual a cero. La macrocelda implementa el esquema de ICIC FFRopa. Para los tres esquemas de coordinación probados, podemos observar que la probabilidad de descarte tanto para los usuarios de las macroceldas como para los usuarios de las femtoceldas es prácticamente idéntica para ambos escenarios. Si bien puede observarse que para el esquema 4 la probabilidad de descarte para los usuarios de la femtocelda es algo superior cuando el despliegue se realiza en $\pi/6$ para situaciones en las que la femtocelda está cargada. Esto puede deberse a que como las femtoceldas están desplegadas en la dirección de máxima radiación del sector reciben mayores niveles de interferencia en los RBs de la zona interior preasignados a ese sector, los cuales son empleados por las femtoceldas en el esquema 4.





c) Esquema 4

Figura 23. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación del sector

En la Figura 24 se comparan los resultados obtenidos en el escenario en el que las femtoceldas se despliegan en el interior con un ángulo igual a cero con el escenario en el que las femtoceldas se despliegan con un ángulo igual a $-\pi/6$, de tal forma que son desplegadas en la frontera entre los sectores 0 y 2. El mecanismo de ICIC en la macrocelda es FFRopa. En la gráfica 24.a) podemos observar que los resultados obtenidos para el esquema 5, que permite a las femtoceldas emplear 3 RBs han sido idénticos para ambos escenarios. Sin embargo hay que destacar, que este esquema de coordinación se ha diseñado específicamente para las situaciones en las que la femtocelda es desplegada en la frontera entre sectores. Con esto lo que se quiere remarcar, es que si bien se han obtenido los mismos resultados para ambos escenarios hay que tener en cuenta que si la femtocelda se despliega en un ángulo cero compensa más emplear esquemas que permitan a la femtocelda utilizar un mayor número RBs como pueden ser el esquema 1 y 2, ya que así aumentamos considerablemente la capacidad.

En la gráfica 24.b) se muestran los resultados para el Esquema 6, que es el Esquema 4 pero adaptado a los casos en los que la femtocelda se despliega en la frontera entre sectores. De nuevo vemos que aumentando el número de RBs disponibles para la femtocelda nos permite aumentar considerablemente la capacidad de las mismas. Podemos observar que las prestaciones de las femtoceldas se degradan un poco para el caso de $-\pi/6$, lo cual puede deberse a que ahora recibe interferencia en los RBs interiores preasignados a los sectores 0 y 2 al estar desplegada entre ambos y en el caso de estar desplegada en un ángulo igual a cero recibe sobre todo interferencia en los RBs interiores preasignados al sector 0.

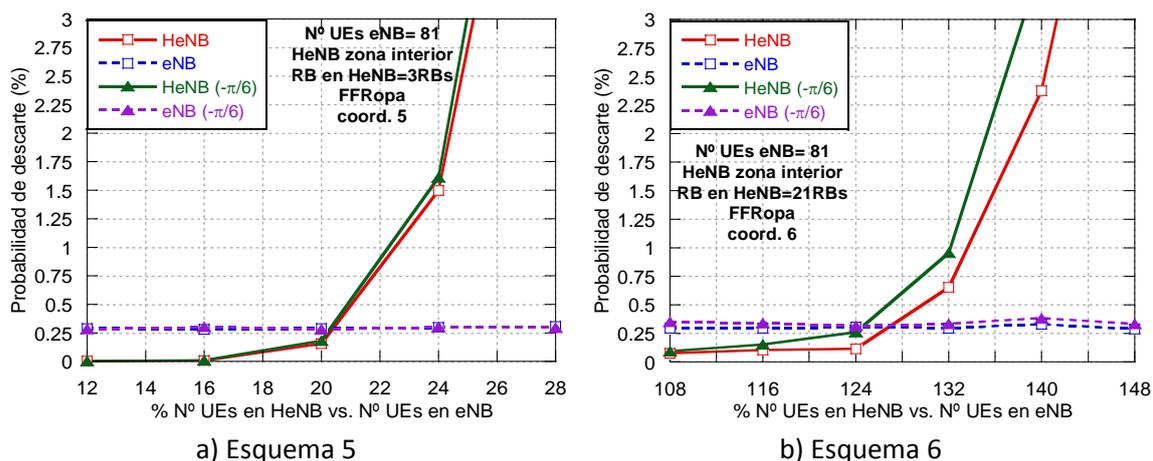
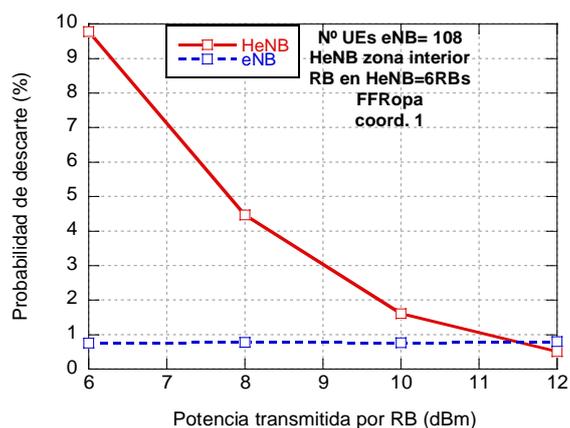


Figura 24. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los esquemas de coordinación propuestos pero para el caso en el que cada macrocelda sirve a 108 usuarios. Por lo tanto se comentarán las principales diferencias entre ambas situaciones: 81 usuarios y 108 usuarios. En primer lugar hay que destacar la Figura 25, en la cual se ha realizado un barrido de potencia, es decir, se ha ido modificando la potencia de transmisión media por RB (M_{med}) del esquema 1. Podemos comprobar que aumentando la potencia de transmisión de la femtocelda podemos dar servicio a un mayor número de usuarios, ya que seremos capaces de dar asignación a usuarios con condiciones de canal muy malas y además podremos emplear las MCS más elevadas al disponer de mayor potencia de transmisión. Esto justifica la decisión de emplear siempre la máxima potencia de transmisión posible repartiendo la potencia máxima de la femtocelda entre el número de RBs disponibles para un esquema de coordinación dado.



En las gráficas de la Figura 26 se representan los resultados de la Figura 22 para el escenario en el que las femtoceldas se despliegan con un ángulo igual a cero pero con 108 usuarios en cada macrocelda. Las conclusiones que se pueden extraer de las cuatro gráficas son las mismas que para el caso de 81 usuarios, si bien merece la pena resaltar que si comparamos la probabilidad de descarte de paquetes de los usuarios de las macroceldas obtenido con 108 usuarios en cada macrocelda con el de 81 usuarios vemos que es

considerablemente mayor. Esto es lógico ya que cuanto mayor sea la carga de las macroceldas mayor será la probabilidad de descarte de estos paquetes. De hecho podemos observar que para el caso de emplear FFR estamos superando bastante la cota marcada de obtener una probabilidad de descarte inferior al 1%. Si observamos la gráfica 26.c) vemos que empleando 24 RBs se produce un aumento considerable de la probabilidad de descarte de los usuarios de la macrocelda respecto a la obtenida empleando esquemas como el 1 o el 2 que solo permiten a las femtoceldas emplear 6 y 10 RBs. Esto nos indica que en situaciones en las que la macrocelda está cargada, el hecho de que las femtoceldas empleen gran parte de los recursos de la macrocelda provoca una degradación en las prestaciones de los usuarios de la macrocelda. Sin embargo para situaciones de menor carga, como para el caso de 81 usuarios en cada macrocelda, observando la gráfica 22.c) vemos que no se produce una degradación apreciable de los usuarios de la macrocelda con respecto a los esquemas 1 y 2.

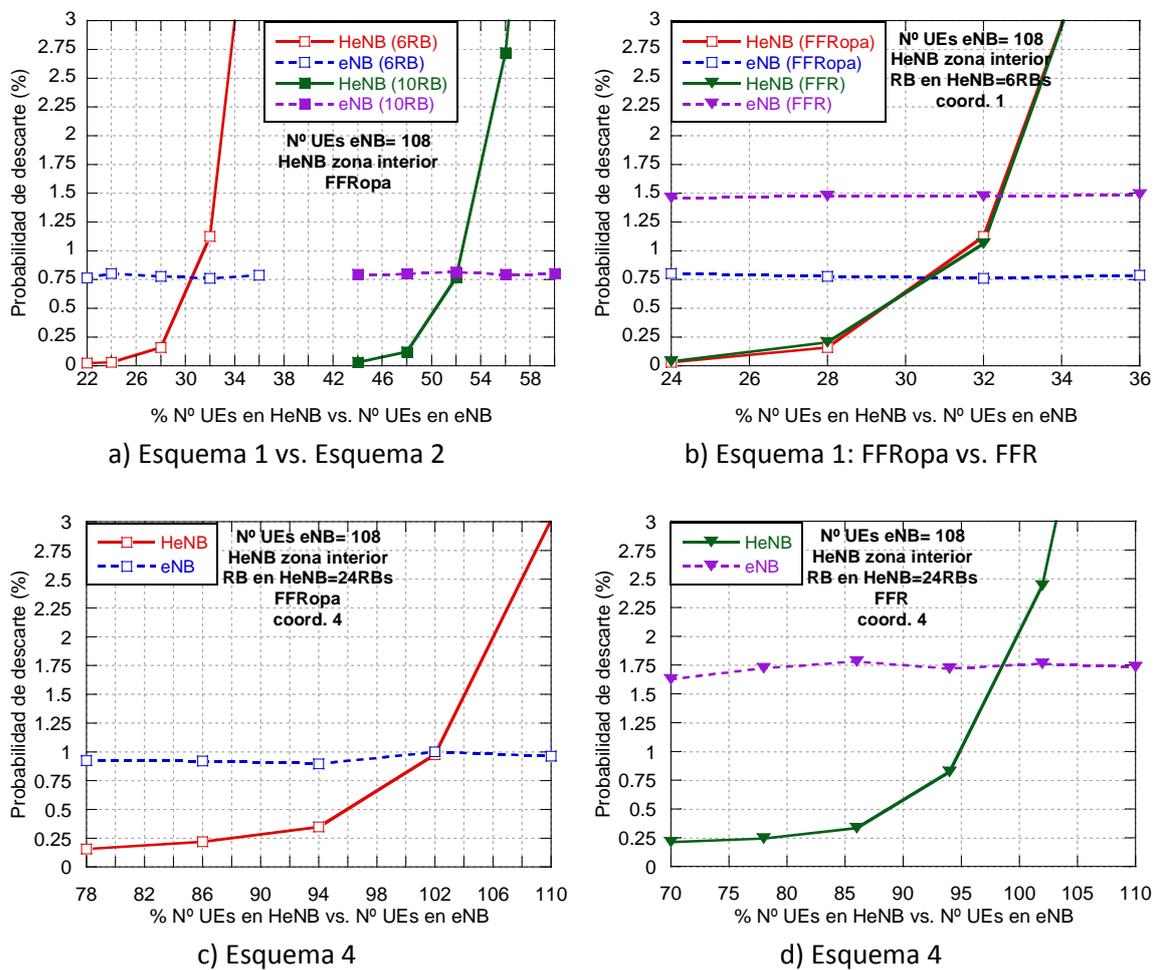


Figura 26. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior

En la Figura 27 aparecen reflejados los resultados obtenidos para el despliegue de las femtoceldas en $\pi/6$. En cuanto a los esquemas 1 y 2 (gáficas 27.a) y 27.b)) podemos observar una mejoría en la probabilidad de descarte de los usuarios de las femtoceldas para el caso de $\pi/6$ respecto al despliegue en ángulo cero, que para el caso de 81 usuarios no era tan acusada. Esto puede deberse a que en la dirección de máxima radiación del sector las femtoceldas reciben menos interferencias de los sectores 1 y 2 de las macroceldas vecinas con

lo que son capaces de soportar una mayor capacidad. Este efecto es más visible cuanto mayor sea la carga de las macroceldas, ya que potencialmente existirá mayor ICI. Para el esquema 4 (gráfica 27.c)) las conclusiones son las mismas que para el caso de 81 usuarios en cada macrocelda.

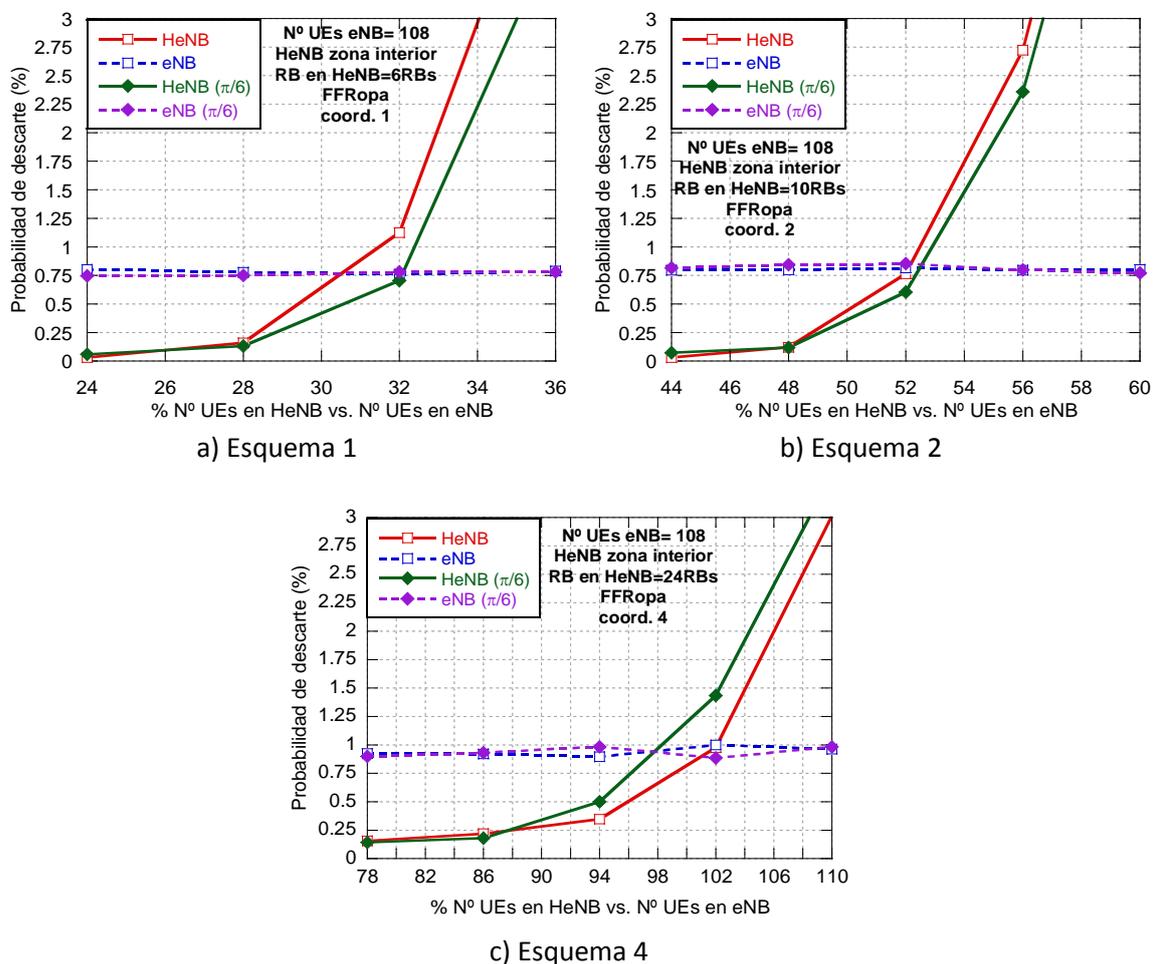


Figura 27. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación del sector

En la Figura 28 se muestran los resultados para el despliegue en $-\pi/6$ y las conclusiones son similares a las expuestas para el caso de 81 usuarios en cada macrocelda si bien hay que notar en el esquema de coordinación 6 (gráfica 28.b)) que la degradación de prestaciones en la probabilidad de descarte de los usuarios de las femtoceldas para el despliegue en $-\pi/6$ que comentábamos para el caso de 81 usuarios no es tan acusada para 108 usuarios.

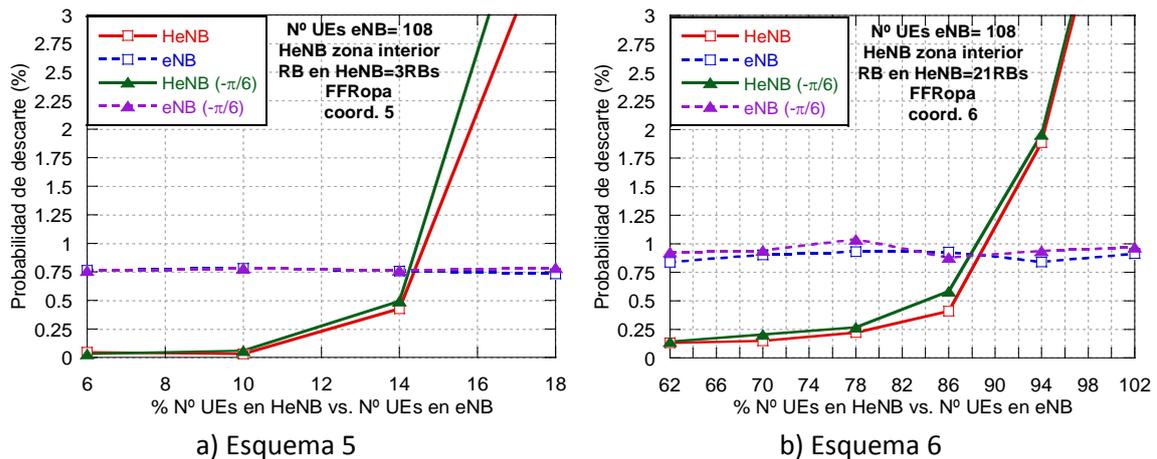


Figura 28. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores

Cabe resaltar que si calculamos el número de usuarios que la femtocelda puede servir por cada RB, podemos observar para los diferentes esquemas de coordinación que este número es más elevado para el caso en el que la macrocelda sirve a 81 usuarios que para el caso en el que la macrocelda sirve a 108 usuarios. Esto es lógico, ya que cuanto mayor es la carga de las macroceldas mayor será la utilización de los RBs y por lo tanto las femtoceldas sufrirán mayor interferencia disminuyendo su capacidad. Por lo tanto la capacidad de las femtoceldas se ve mermada cuando las macroceldas están soportando cargas elevadas.

Ahora nos centramos en los resultados obtenidos para el despliegue de las femtoceldas en la zona exterior de las macroceldas. Comenzaremos por el escenario en el que son desplegadas con un ángulo igual a cero, cuyos resultados aparecen reflejados en la Figura 29. En la gráfica 29.a) se comparan los esquemas 3 y 4, los cuales permiten a las femtoceldas emplear 18 y 24 RBs respectivamente. Como ya hemos venido comentando el factor limitante es el número de RBs de que dispone la femtocelda, obteniendo un aumento importante de capacidad para el esquema 4, que permite un número máximo de usuarios en la femtocelda de 153 para garantizar una probabilidad de descarte inferior al 1%. Se puede volver a observar que el hecho de que las femtoceldas empleen gran parte de los RBs hace que la probabilidad de descarte de los usuarios de la macrocelda aumente ligeramente. Sin embargo esta degradación no es excesiva gracias a la reducida potencia de transmisión empleada por las femtoceldas. De nuevo hay que notar que la femtocelda puede servir a un gran número de usuarios gracias a la cercanía de sus usuarios que le permite emplear las MCSs más elevadas.

En la gráfica 29.b) podemos observar la comparación entre emplear el esquema de coordinación 4 sobre FFRopa frente a emplearlo sobre FFR. Como ya hemos comentado, las mejoras de FFRopa sobre FFR hacen que la probabilidad de descarte de los usuarios de las macroceldas sea inferior cuando se emplea FFRopa que cuando se emplea FFR. Las femtoceldas están empleando 24 RBs, entre los cuales están los 18 RBs que emplea la macrocelda para su subbanda interior, por lo que la mayor variabilidad en la ICI debida a emplear FFR en lugar de FFRopa provoca también una degradación en las prestaciones de las femtoceldas.

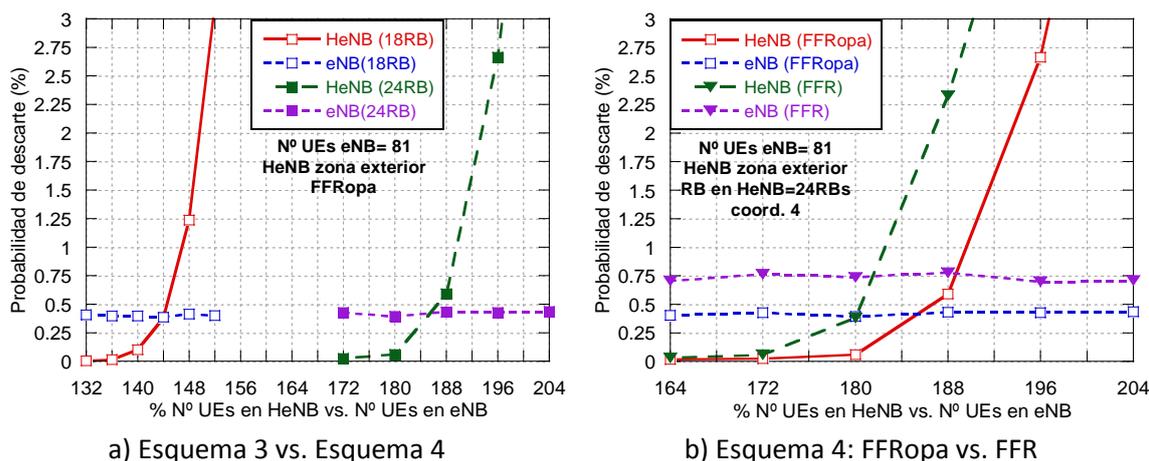


Figura 29. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior

En la Figura 30 se muestran los resultados obtenidos cuando las femtoceldas se despliegan en la dirección de máxima radiación del sector 0. Podemos observar en la gráfica 30.a) que aunque las prestaciones de las femtoceldas se mantienen iguales a las obtenidas con el despliegue con un ángulo cero, los usuarios de las macroceldas sufren una degradación considerable, acercándose al 1% de probabilidad de descarte de paquetes. Debido a que se despliegan celdas hexagonales, cuando las femtoceldas se despliegan en la dirección de máxima radiación se encuentran más próximas a las macroceldas vecinas, con lo que aumenta la interferencia que las femtoceldas introducen sobre los usuarios de las macroceldas vecinas, especialmente los situados en los bordes. Si ahora nos centramos en la gráfica 30.b), en la que aparecen los resultados del esquema 4, que permite a las femtoceldas emplear 24 RBs, los cuales son los 18 RBs empleados en el caso anterior (esquema 3) más los 6 RBs de la subbanda interior del propio sector en el que están desplegadas las femtoceldas, vemos que de nuevo se produce la degradación de prestaciones de los usuarios de las macroceldas ya mencionada. Además se puede apreciar también un empeoramiento de la probabilidad de descarte de paquetes para los usuarios de las femtoceldas cuando son desplegadas con un ángulo de $\pi/6$. Esto es debido a que los 6 RBs que añade a las femtoceldas el esquema 4 respecto al esquema 3 son los RBs que emplea el propio sector en su subbanda interior, por lo tanto ahora les llega mayor potencia interferente a los usuarios de la femtocelda al estar desplegada en la dirección de máxima radiación del sector.

Como los esquemas 3 y 4 hacen que aumente la probabilidad de descarte de los usuarios de la macrocelda cuando se despliegan las femtoceldas en $\pi/6$ se pensó en reducir el número de RBs que pueden emplear las femtoceldas a 12RBs que es en lo que consiste el esquema de coordinación 7 (gráfica 30.c). Vemos que al eliminar de los RBs posibles los RBs de las zonas exteriores de los sectores en los que no son desplegadas las femtoceldas se ha reducido la probabilidad de descarte de los usuarios de las macroceldas. Sin embargo la capacidad de las femtoceldas se ve drásticamente reducida, ya que hemos podido ir observando que el factor limitante de la capacidad de las femtoceldas es el número de RBs del que disponen. Por lo tanto se nos plantea un compromiso entre maximizar la capacidad de las femtoceldas y limitar la degradación que sufren las macroceldas.

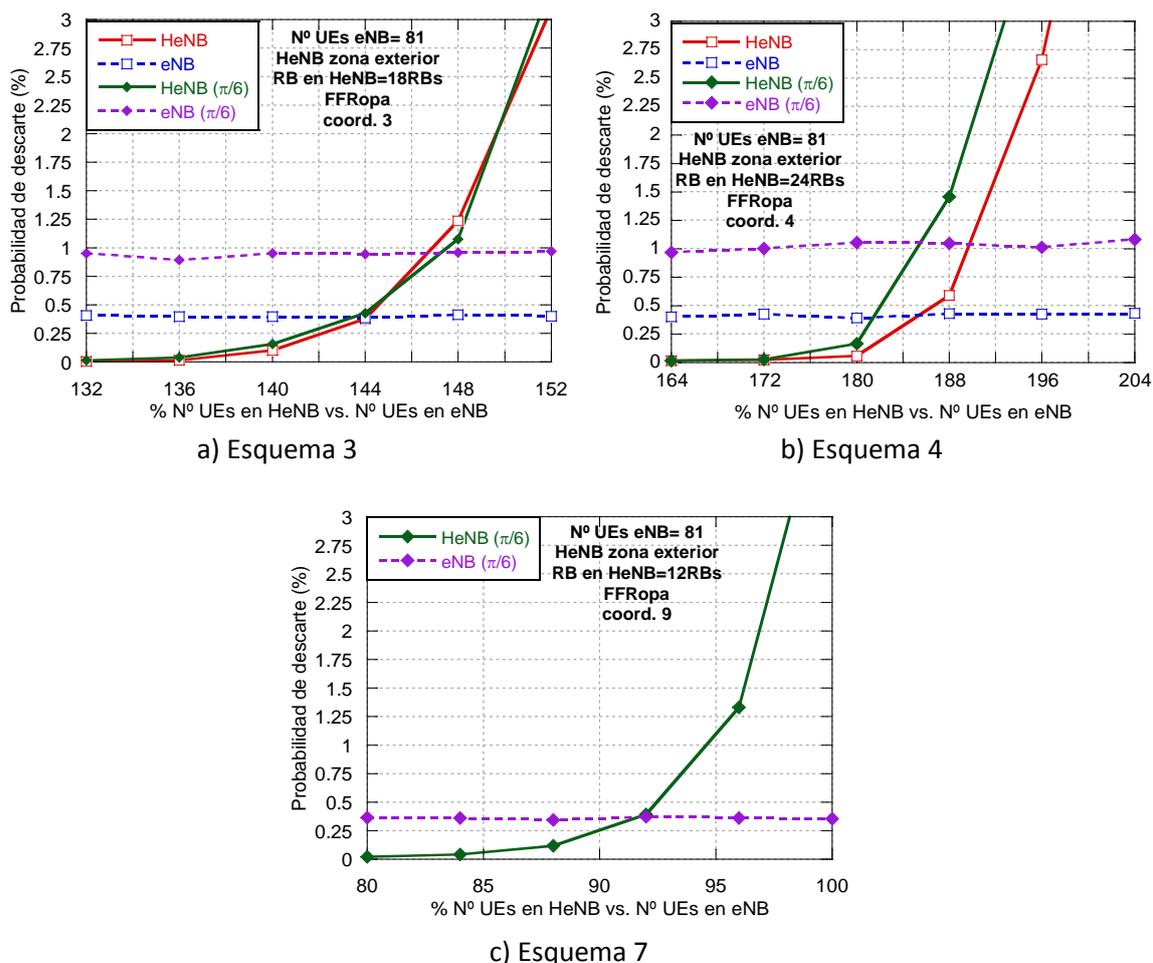


Figura 30. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación del sector

En la Figura 31 se comparan los resultados obtenidos para el despliegue de las femtoceldas en la frontera entre sectores y los obtenidos para el despliegue con un ángulo igual a cero. Podemos observar que se produce una degradación en las prestaciones de los usuarios de la macrocelda para el despliegue en la frontera entre sectores. Como hemos comentado para el caso anterior, al desplegar las femtoceldas en $-\pi/6$ están colocadas más cerca de las macroceldas vecinas de tal forma que introducen más interferencia sobre sus usuarios. Si comparamos esta degradación con la observada en las gráficas a) y b) de la Figura 30 vemos que es menor y esto es debido a que en el esquema 6 solo se emplean los RBs de la subbanda exterior del sector 1, con lo que las femtoceldas solo interfieren a los sectores 1 de sus macroceldas vecinas, en lugar de a los sectores 1 y 2 como en los esquemas 3 y 4. En cuanto a la probabilidad de descarte de los usuarios de las femtoceldas, se produce una pequeña degradación para el despliegue en la frontera que puede deberse a que reciben mayores niveles de interferencia de los sectores 1 de las macroceldas vecinas.

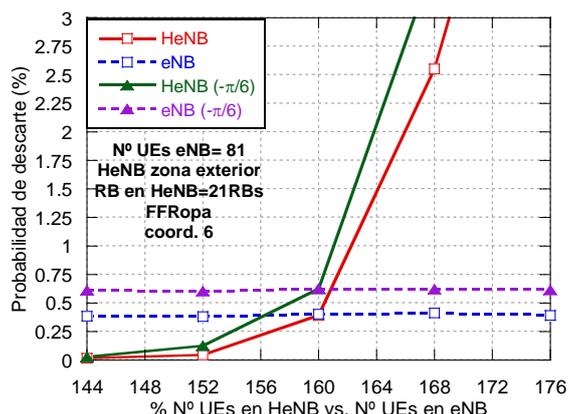


Figura 31. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores

A continuación se muestran los resultados de las mismas pruebas comentadas antes pero para el caso en el que cada macrocelda sirve a un total de 108 usuarios. Ya habíamos comentado que el hecho de que las femtoceldas empleen gran parte de los recursos de las macroceldas provoca una degradación en las prestaciones de los usuarios de las macroceldas como podemos comprobar en la gráfica a) de la Figura 32. Si lo comparamos con los resultados obtenidos para el Esquema 4 en la zona interior vemos que esta degradación es mayor. Además también podemos observar que se degradan más las prestaciones cuando empleamos 24 RBs que cuando empleamos 18 RBs como es lógico. Sin embargo como venimos comentando anteriormente el hecho de emplear 24 RBs hace que aumente considerablemente la capacidad de las femtoceldas respecto a emplear 18 RBs, de tal forma que sigue existiendo el compromiso entre maximizar la capacidad de las femtoceldas y la degradación que sufren los usuarios de las macroceldas. En cuanto a la comparación del esquema de coordinación 4 sobre FFR y FFRopa (gráfica 32.b) se pueden extraer las mismas conclusiones que para el caso de 81 usuarios por macrocelda.

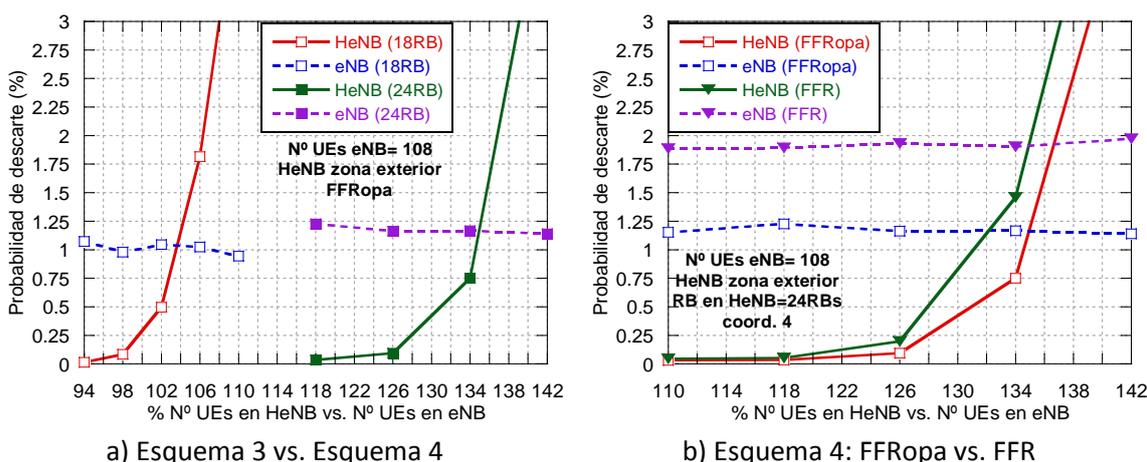


Figura 32. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior

En la Figura 33 podemos observar los resultados para el caso en el que las femtoceldas se despliegan en $\pi/6$. Las conclusiones que pueden extraerse son las mismas que para el caso de 81 usuarios, ya que como ya comentamos el hecho de que las femtoceldas estén más cerca

de las macroceldas vecinas provoca una degradación de prestaciones tanto para los usuarios de las macroceldas como para los de las femtoceldas. De nuevo el esquema de coordinación 7 nos permite reducir la probabilidad de descarte de los usuarios de la macrocelda al reducir el número de RBs que emplean las femtoceldas pero a costa de perder mucha capacidad en las femtoceldas.

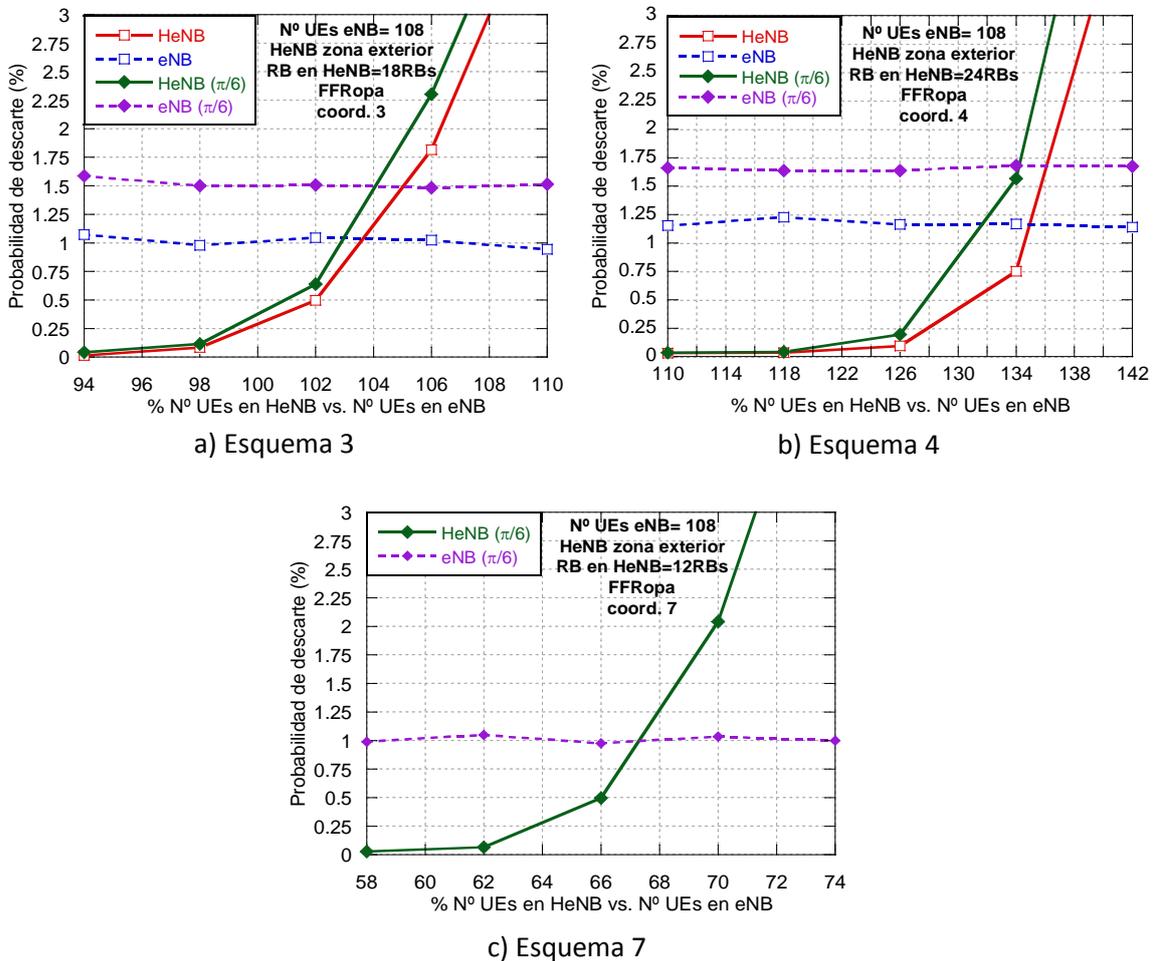


Figura 33. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación

En la Figura 34 se representan los resultados del esquema de coordinación 6 para el despliegue de las femtoceldas en la frontera entre los sectores 0 y 2. En este caso no cabe resaltar ninguna diferencia respecto al escenario con 81 usuarios en cada macrocelda, ya que de nuevo se produce una degradación de las prestaciones tanto de los usuarios de las macro como de las femtoceldas.

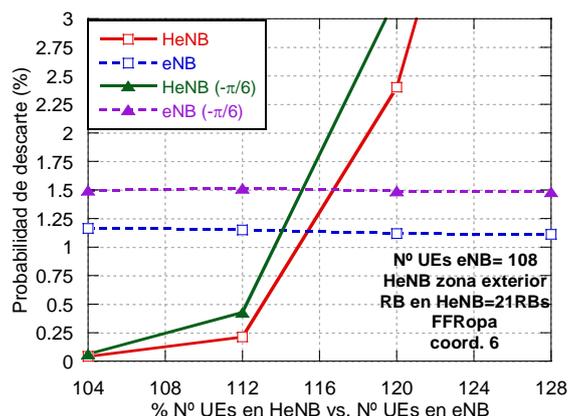


Figura 34. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores

A modo de resumen, hay que destacar que los esquemas de coordinación 4 y 6 se han empleado tanto para los despliegues de las femtoceldas en el interior como en el exterior. Como los resultados han ido mostrando que para maximizar la capacidad de las femtoceldas lo más conveniente era permitirle emplear el máximo número de RBs posibles se ha optado por pensar estos dos esquemas y aplicarlos a ambas zonas. En [5] y [15] la propuesta consistía en que las femtoceldas desplegadas en el exterior pudiesen emplear todos los RBs menos los reservados para la subbanda exterior del sector en el que está desplegada, sin embargo para las femtoceldas desplegadas en el interior solo proponían que se empleasen los RBs reservados para las zonas exteriores de los dos sectores en los que no estuviese desplegada. En [4] la propuesta era aún más restrictiva ya que las femtoceldas solo podían emplear los recursos que no eran empleados en el sector de la macrocelda en el que estuviesen desplegadas, independientemente de si la femtocelda se encontraba en zonas interiores o exteriores. Por lo tanto hemos visto en los resultados que se puede ir un paso más allá, y permitir que las femtoceldas desplegadas tanto en el interior como en el exterior reutilicen también los RBs reservados para la subbanda interior de la macrocelda, incluidos los empleado por el propio sector en el que están desplegadas. También hemos observado que el esquema de ICIC de la macrocelda juega un papel importante, ya que en los casos en los que se aplica el esquema FFR, la mayor variabilidad de la ICI en la subbanda interior respecto a aplicar FFRopa, provoca una degradación en la capacidad de las femtoceldas.

Revisando ambos escenarios podemos observar que para las femtoceldas desplegadas en el exterior se consigue una mayor capacidad de usuarios que para las femtoceldas desplegadas en el interior. Sin embargo, como contrapartida las femtoceldas desplegadas en el exterior degradan en mayor medida las prestaciones de los usuarios de las macroceldas que cuando son desplegadas en el interior. Esto se debe a que las femtoceldas desplegadas en el exterior observan mejores condiciones en los RBs de la subbanda interior, permitiendo maximizar la capacidad, sin embargo al estar situadas cerca de la frontera de la macrocelda afectan más a los usuarios de los bordes de las macroceldas vecinas de tal forma que se degradan las prestaciones de los usuarios de las macroceldas.

4.2 Despliegue de una rejilla 3x3

En este apartado se analizan los resultados para el segundo tipo de despliegue: la rejilla. Comenzamos analizando los resultados para el caso en el que las macroceldas sirven a 81 usuarios cada una. En la Figura 35 se representan los resultados obtenidos para el caso en el que la rejilla se despliega en la zona interior de la macrocelda en un ángulo igual a cero. Observando la gráfica 35.a) (esquemas 8 y 14, este último con 10RBs) vemos que aumentando el número de RBs que pueden emplear las femtoceldas estamos aumentando considerablemente la capacidad, lo cual es coherente con los resultados vistos en el otro despliegue. Además hay que tener en cuenta que en el esquema 14 se aplica coordinación entre femtoceldas de tal forma que se consigue una mejora adicional en la capacidad de las femtoceldas frente al esquema 8. En la gráfica 35.b) se comparan los esquemas 14 y 15. En este caso la implementación del esquema 14 es tal que ambos esquemas permiten que las femtoceldas empleen 24 RBs de los cuales dos RBs se reservan para la zona exterior y los otros 22 para la zona interior. La principal diferencia entre ambos esquemas es que en el caso del esquema 14 los dos RBs exteriores son los que forman el grupo de RBs prioritarios mientras que para el caso del esquema 15 el grupo de RBs prioritarios está formado por los 2 RBs exteriores más 8 RBs interiores. Aunque el esquema 15 mejora la ortogonalidad de las asignaciones de recursos en el exterior de las femtoceldas (respecto al esquema 14) podemos ver que el esquema 14 ofrece ligeramente mejores prestaciones. Esto se debe principalmente al hecho de que en el esquema 15 al considerar 10 RBs prioritarios, se concentran la gran mayoría de transmisiones en esos RBs (8 de ellos comunes), que son empleados por las nueve femtoceldas lo que provoca un aumento de la interferencia en estos RBs produciéndose una degradación de las prestaciones. En el esquema 14, aunque las transmisiones se concentren en los 2 RBs prioritarios, estos no son los mismos para todas las femtoceldas con lo que no aumenta en exceso la interferencia en estos RBs y el resto de transmisiones se distribuyen de forma más homogénea entre los 22 RBs restantes. En la gráfica 35.b) también se compara el uso de FFR con FFRopa, concretamente empleando en las femtoceldas el esquema 14. Vemos que las prestaciones en ambos esquemas para las femtoceldas son prácticamente idénticas si bien se produce la degradación ya comentada anteriormente (en el escenario con una sola femtocelda) en la probabilidad de descarte de los usuarios de las macroceldas al emplear FFR.

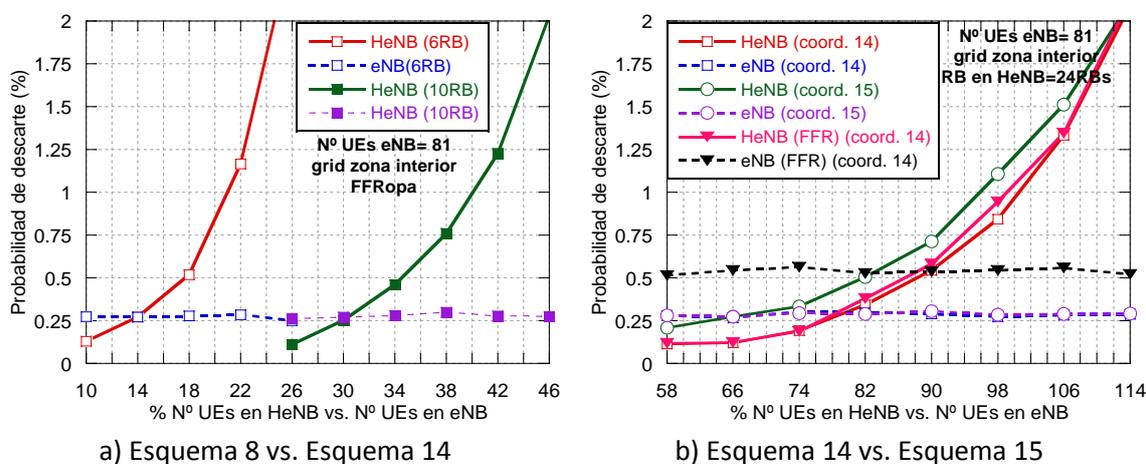


Figura 35. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior

En la Figura 36 se muestran los resultados obtenidos para el esquema 14 para el despliegue en $\pi/6$. Las prestaciones obtenidas en comparación con el despliegue en un ángulo cero son bastante similares, con lo cual podemos deducir que es posible que las femtoceldas reutilicen gran parte de los recursos de la macrocelda. En la rejilla, los usuarios se encuentran más cerca de las femtoceldas que en el despliegue de una femtocelda en cada macrocelda, de tal forma que son menos sensibles a la interferencia introducida por la macrocelda, ya que tienen buenas condiciones de canal con su femtocelda.

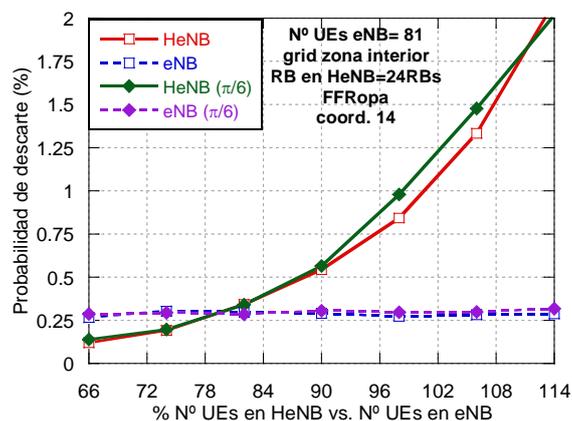


Figura 36. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación

El esquema de coordinación 14 se adaptó para el despliegue de la rejilla en la frontera entre dos sectores dando lugar al esquema 16. En la Figura 37 podemos ver la comparación de este esquema con el despliegue en un ángulo cero del esquema 14. Se aprecia una ligera mejoría en el esquema 16 para situaciones de baja carga en la femtocelda. En el esquema 16 la primera línea de femtoceldas de la rejilla (situada fundamentalmente en el sector 0) y la última (situada prioritariamente en el sector 2) emplean diferentes RBs prioritarios (la primera línea dispone de los 3 RBs de la zona exterior del sector 2, mientras que la última línea dispone de los RBs exteriores del sector 0), reduciéndose la interferencia co-layer. A medida que la carga de las femtoceldas aumenta y se ocupan todos los RBs las prestaciones se equiparan con el esquema 14. Las prestaciones de los usuarios de la macrocelda empeoran en el esquema 16, debido a que las transmisiones de las femtoceldas afectan a los usuarios que se encuentran en los bordes entre sectores de la macrocelda, los cuales ya de por sí experimentan malas condiciones en cuanto a nivel de potencia de señal recibida. El empeoramiento parece muy pequeño pero hay que tener en cuenta que la rejilla solo se despliega en la macrocelda 0 y en los resultados se muestra la probabilidad de descarte de los usuarios de todas las macroceldas, con lo que el empeoramiento en la macrocelda en la que está desplegada la rejilla es más severo. La probabilidad de descarte de los usuarios de las femtoceldas es similar al comparar el esquema 16, tanto para el caso de FFRopa (gráfica 37.a) como para el de FFR (gráfica 37.b).

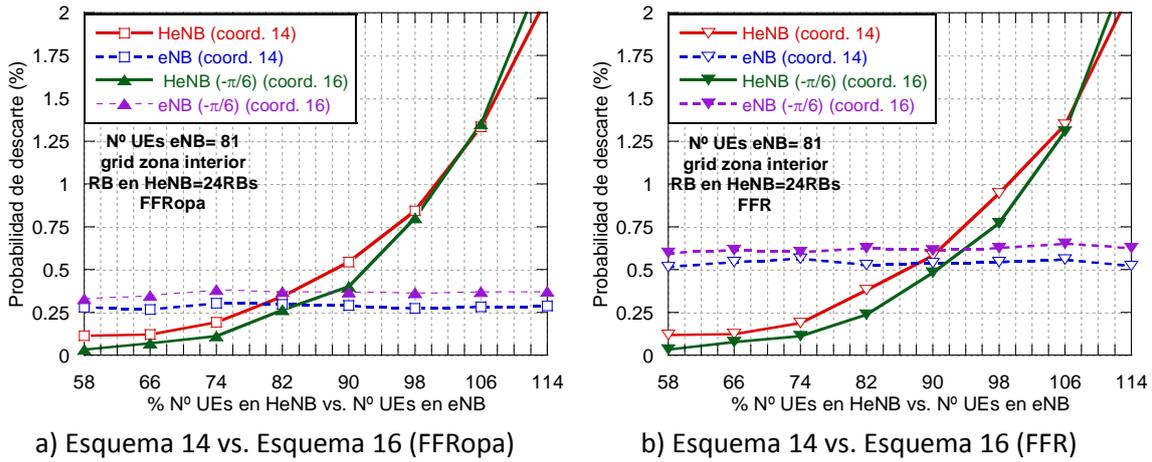


Figura 37. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores

A continuación se muestran las mismas evaluaciones para el caso en el que cada macrocelda sirve a 108 usuarios en lugar de 81 usuarios. En la Figura 38 se muestran los resultados para el despliegue de la rejilla en el ángulo cero. Tanto en la gráfica 38.a) como en la 38. b) el comportamiento es similar al comentado en el caso de 81 usuarios. Se puede observar que de nuevo cuando aumentamos el número de RBs disponibles por las femtocelas aumentamos considerablemente la capacidad de las mismas, al dotar al scheduling de más flexibilidad.

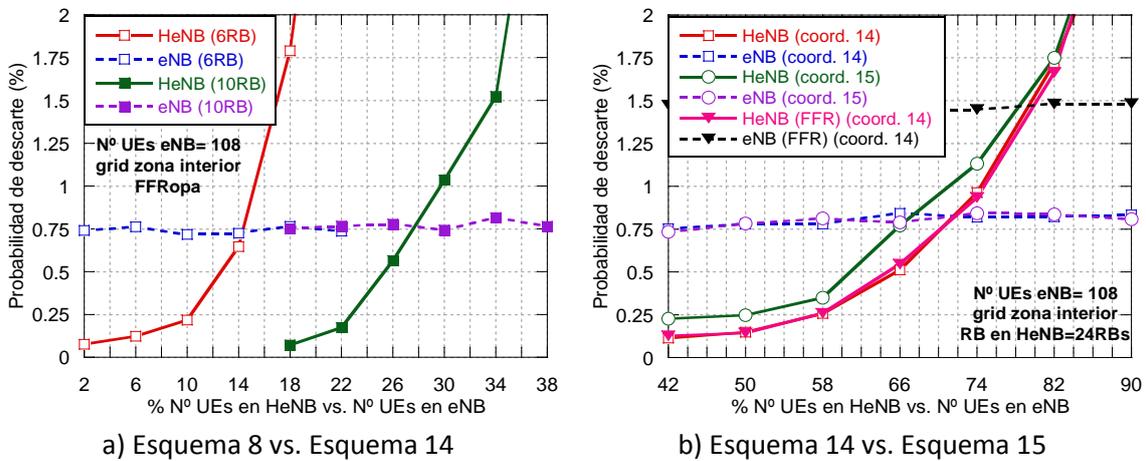


Figura 38. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior

Respecto a la Figura 39 podemos observar de nuevo que tanto en el despliegue en el ángulo cero como en $\pi/6$ se obtienen las mismas prestaciones cuando se aplica el esquema de coordinación 14, como hemos visto en el caso de 81 usuarios.

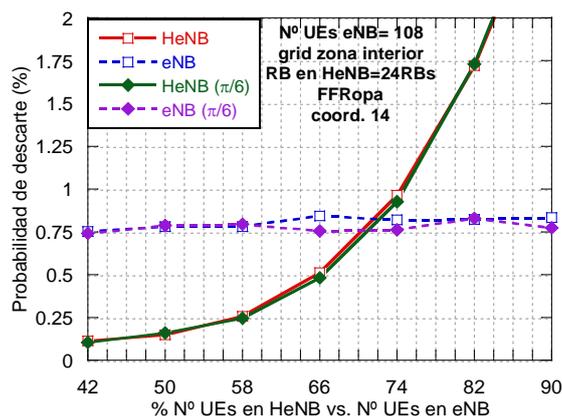


Figura 39. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y dirección de máxima radiación

En la Figura 40 se muestra una comparación entre los esquemas 14 y 16 para el despliegue de la rejilla en un ángulo cero y $-\pi/6$ respectivamente. De la misma forma que como se comentó en caso de 81 usuarios las prestaciones son bastante similares aunque se aprecia una ligera mejora para el esquema 16 en la probabilidad de descarte de los usuarios de las femtoceldas en situaciones de baja carga en las femtoceldas. Sin embargo también se aprecia un empeoramiento de la probabilidad de descarte de los usuarios de las macroceldas.

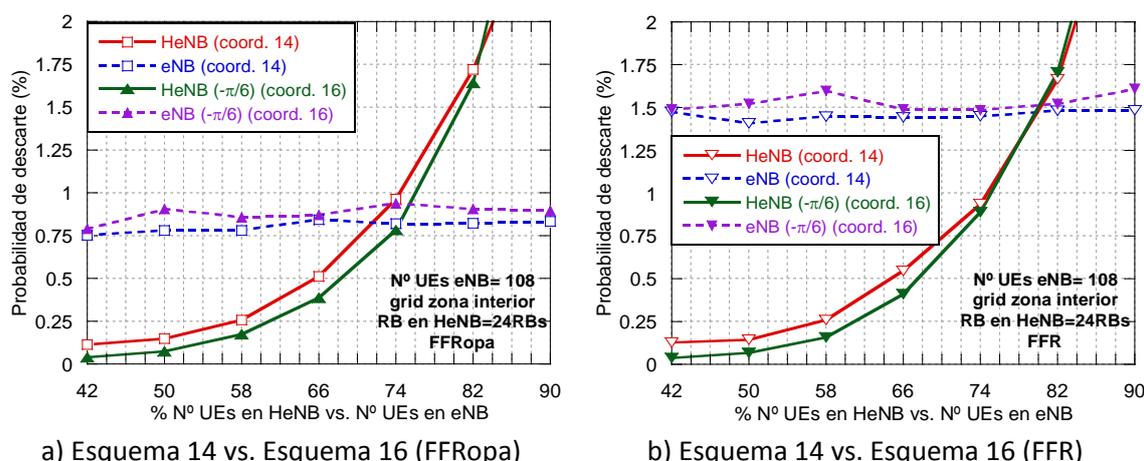
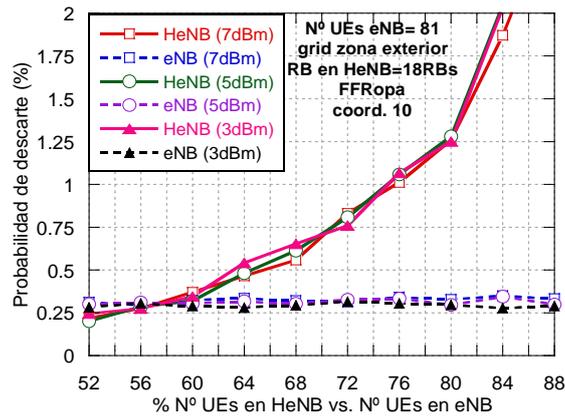


Figura 40. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona interior y frontera entre dos sectores

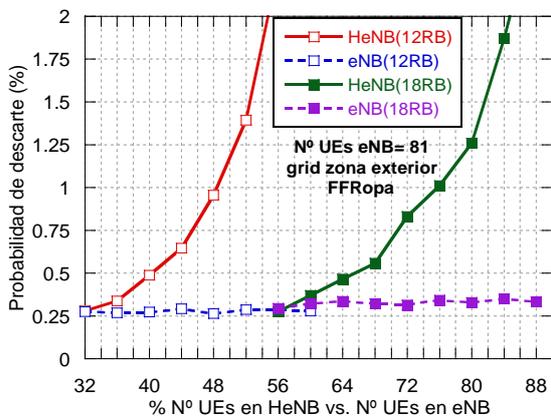
A modo de comparación entre el caso de 81 usuarios y el caso de 108 usuarios, podemos calcular cuantos usuarios por RB son capaces de aceptar las femtoceldas y de nuevo podemos observar que cuando la macrocelda está menos cargada las femtoceldas son capaces de soportar un mayor número de usuarios, sin embargo las diferencias son mucho menores que para el despliegue de una femtocelda en cada macrocelda. Por ejemplo para el caso del esquema 14, para la situación de 81 usuarios en cada macro las femtoceldas pueden dar servicio a aproximadamente 81 usuarios mientras que para la situación de 108 usuarios en cada macro pueden dar servicio a aproximadamente 79 usuarios. Como hemos dicho las diferencias son muy pequeñas y esto se debe a que debido a la cercanía de los usuarios a sus femtoceldas son menos sensibles a las condiciones concretas de las macroceldas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos cuando la rejilla es desplegada en la zona exterior de la macroceldas para el caso en el que cada macrocelda sirve a 81 usuarios. En la gráfica 41.a) se puede observar un barrido de potencia realizado para el esquema 10 en el que podemos ver que variar la potencia de transmisión por RB (M_{med}) de las femtoceldas no varía las prestaciones por lo que se consideró ajustar la potencia de transmisión para los esquemas sin coordinación entre femtoceldas a 7dBm como ya se ha explicado anteriormente. En la gráfica 41.b) podemos observar que aumentando el número de RBs disponibles por las femtoceldas (esquema 10 vs.9) se aumenta la capacidad como se ha venido comentando en el resto de escenarios. En la gráfica 41.c) se muestran los resultados del esquema 11 que ya introduce coordinación entre femtoceldas. Si lo comparamos con el esquema 10 vemos que podemos soportar un menor número de terminales con la calidad de servicio especificada y esto es debido a que aunque ahora existe coordinación entre femtoceldas, al reducir el número de RBs que puede emplear cada una de 18 a 6 la mejora de calidad en un subconjunto de RBs no compensa la pérdida de capacidad. Por lo tanto se implementaron los esquemas 12 y 13 cuyos resultados los podemos observar en las gráficas 41.d) y 41.e) respectivamente, comparados con el esquema 10. Centrándonos en la 41.d) vemos que las prestaciones obtenidas en los esquemas 10 y 12 son bastante similares. En el esquema 12 cada femtocelda disponía de 6 RBs prioritarios y si no se podía asignar a los usuarios en esos RBs se empleaban el resto de RBs. Vemos que para situaciones de baja carga el esquema 12 consigue mejorar las prestaciones respecto al esquema 10 gracias a la coordinación existente entre las femtoceldas que permite disminuir las interferencias. Sin embargo cuando la carga de la femtocelda es elevada, se emplean prácticamente todos los RBs en cada TTI de forma que no hay mucha diferencia entre el esquema 10 y el 12 y por lo tanto se obtienen probabilidades de descarte de paquetes similares.

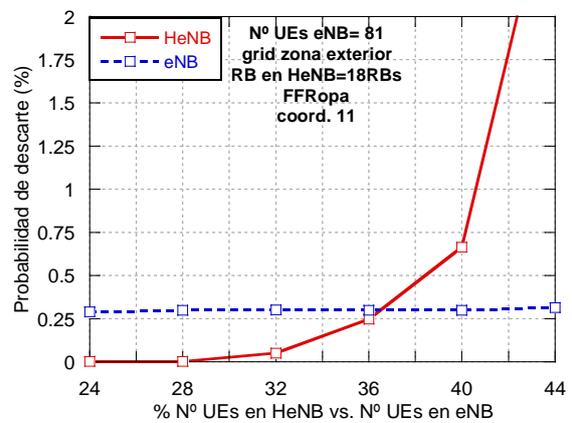
Si ahora nos centramos en la gráfica 41.e) podemos observar que mediante el esquema 13, que es como el esquema 12 pero aplicando dos niveles en la máscara de potencia, conseguimos mejorar las prestaciones de los usuarios de las femtoceldas aumentando la capacidad. Comparando el esquema 13 convencional con su versión de potencias fijas (denotado como pf) podemos ver que realizar un ajuste adaptativo de la potencia en la banda exterior de las femtoceldas aporta grandes ventajas en términos de capacidad de las femtoceldas. Si ahora pasamos a las gráficas 41.f) y 41. g) podemos observar los resultados del esquema 14 tanto para FFR_{opa} como para FFR. Como hemos venido observando el hecho de aumentar el número de RBs disponibles por las femtoceldas aumenta la capacidad de las mismas, tal y como se comprueba comparando el esquema 13 con el 14. Las prestaciones de los usuarios de las femtoceldas tanto si se aplica FFR_{opa} en las macroceldas como FFR son similares. Ya hemos comentado que el hecho de que los usuarios estén muy cerca de las femtoceldas hace que sean menos sensibles a las condiciones de las macroceldas, de tal forma que no se ven afectados tan significativamente por la mayor variabilidad de la interferencia provocada al emplear FFR.



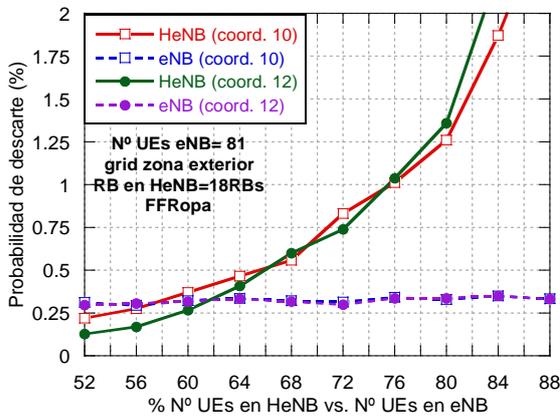
a) Esquema 10: Barrido de potencia



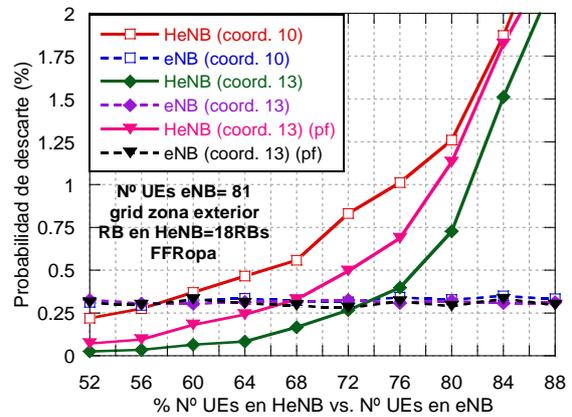
b) Esquema 9 vs. Esquema 10



c) Esquema 11



d) Esquema 10 vs. Esquema 12



e) Esquema 10 vs. Esquema 13

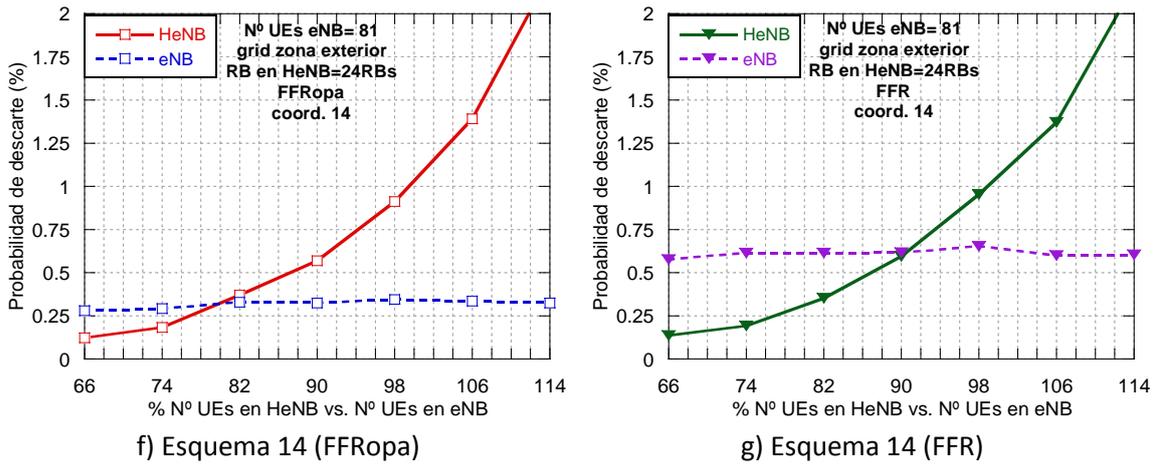


Figura 41. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior

En la Figura 42 se comparan los resultados obtenidos para el despliegue de la rejilla en el ángulo cero con el despliegue en $\pi/6$. Para el caso del Esquema 13 (gráfica 42.a) se puede apreciar un ligero empeoramiento en la capacidad de las femtoceldas para cargas elevadas cuando se realiza el despliegue en la dirección de máxima radiación del sector. Esto se debe a que las femtoceldas sufren un mayor nivel de interferencias al estar en $\pi/6$. Sin embargo para el Esquema 14 (gráfica b)), esta ligera degradación no se produce. Esto puede deberse a que la diversidad frecuencial al disponer de un mayor número de RBs permite compensar el mayor nivel de interferencia. Lo que si es común para ambos esquemas es que provocan un aumento en la probabilidad de descarte de paquetes de los usuarios de las macroceldas. Esto se debe a que al estar la rejilla localizada en $\pi/6$, se encuentra más cerca de las macroceldas vecinas y por lo tanto introducen un mayor nivel de interferencia sobre los usuarios de los exteriores de las mismas.

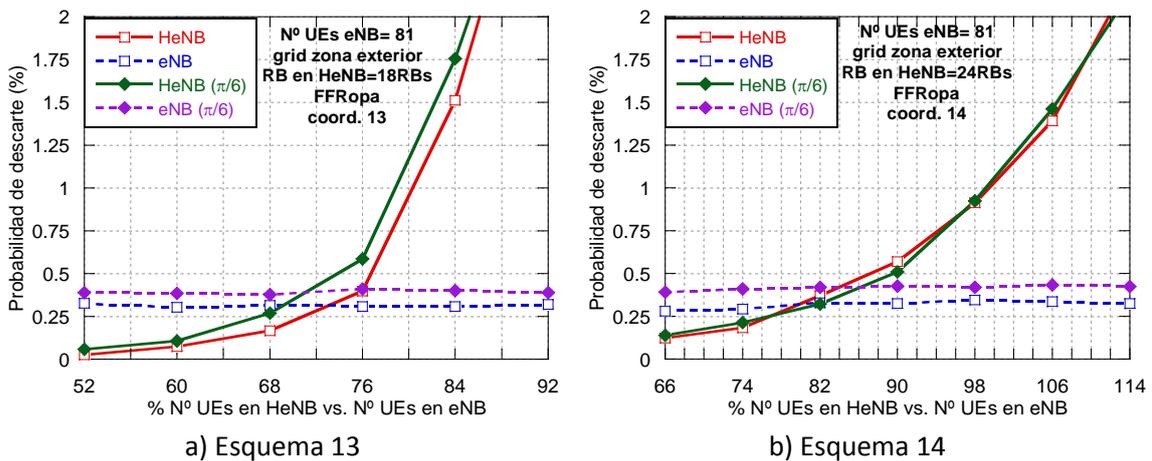


Figura 42. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación

En la Figura 43 se comparan los resultados obtenidos para el esquema 16 en la posición $-\pi/6$ con los obtenidos para el esquema 14 en el ángulo cero. Los resultados son similares a los obtenidos para la situación en la que la rejilla es desplegada en el interior. Es decir, volvemos a observar una ligera mejoría en las prestaciones de las femtoceldas en el

esquema 16 para situaciones de baja carga de la femtocelda, mientras que las prestaciones de los usuarios de las macroceldas se ven degradadas. En este caso, la degradación es más considerable ya que como la rejilla esta situada en el exterior de la macrocelda afecta a los usuarios de los bordes de las macroceldas vecinas, cuyas condiciones de canal son ya de por sí malas. Hay que continuar teniendo en cuenta que la rejilla está desplegada en la macrocelda cero y los resultados son los globales de todas las macroceldas, con lo que la degradación que introduce la rejilla en la macrocelda 0 y las vecinas es bastante considerable.

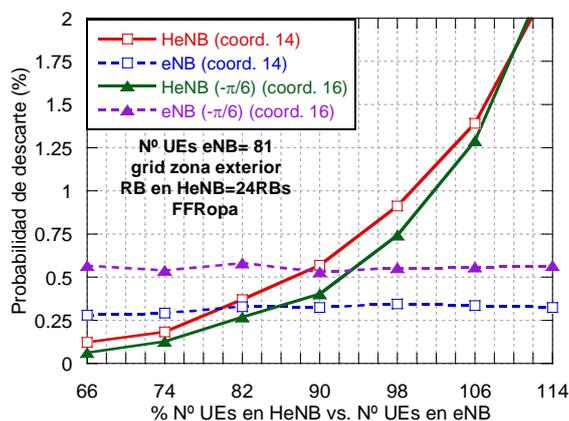
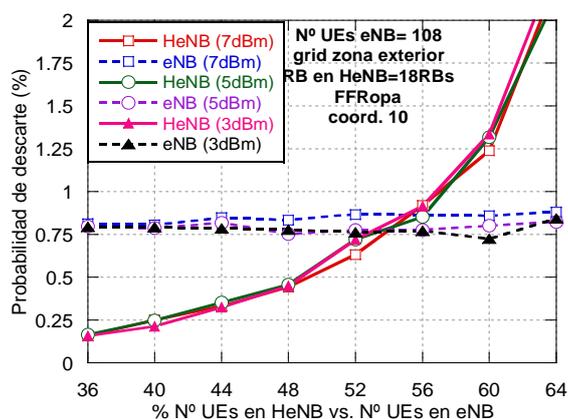


Figura 43. Probabilidad de descarte de paquetes. 81 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores

Por último en las siguientes figuras se muestran los resultados para el caso de desplegar la rejilla en el exterior y con 108 usuarios en cada macrocelda. En la Figura 44 se muestran los resultados para el despliegue en el ángulo cero. Las conclusiones que se pueden extraer son las mismas que para el caso de 81 usuarios. Es decir, una de las claves para aumentar la capacidad de las femtoceldas es aumentar el número de RBs que las femtoceldas pueden emplear. Y además se vuelve a observar que el empleo de máscaras de potencia con dos niveles consigue mejorar las prestaciones de las femtoceldas. El esquema 14 es el que nos permite soportar más usuarios por femtocelda.



a) Esquema 10: Barrido de potencia

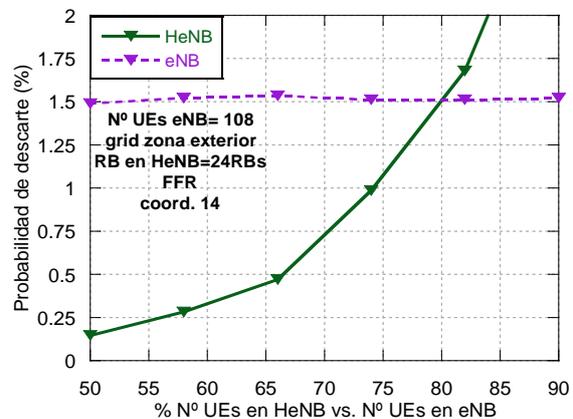
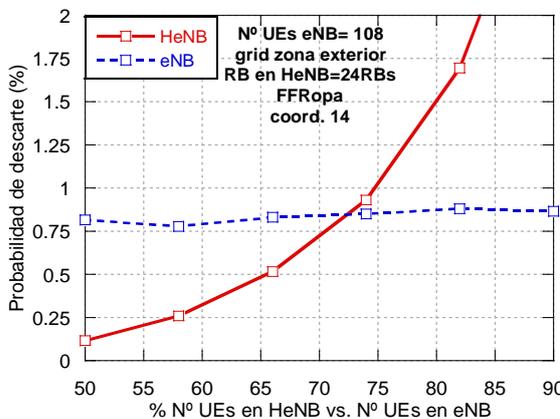
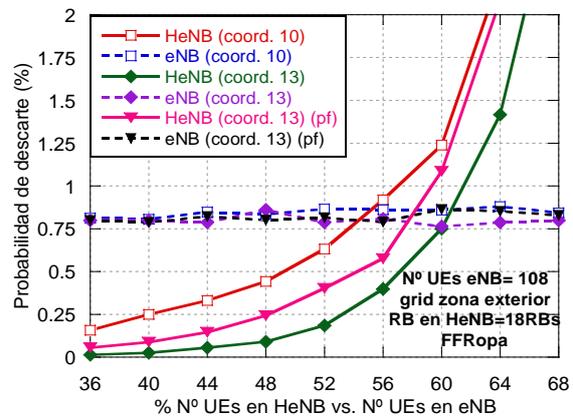
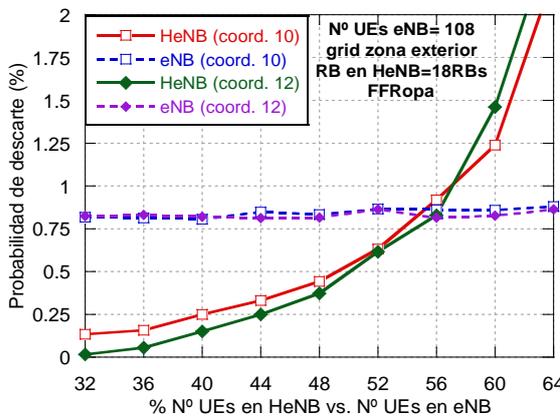
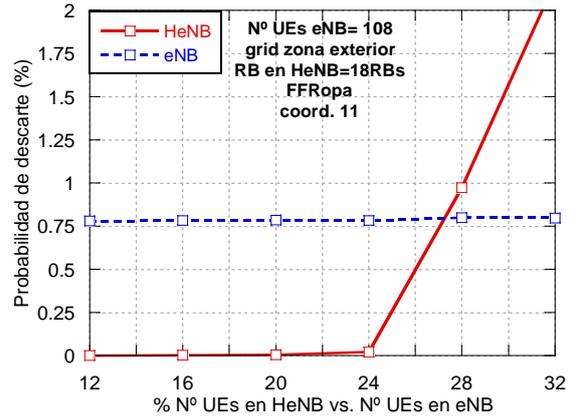
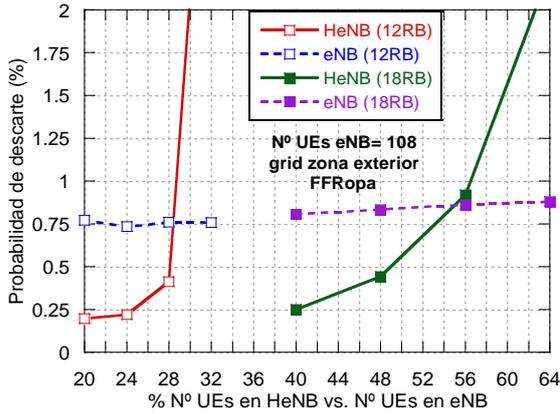


Figura 44. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior

En la Figura 45 se muestran los resultados para los esquemas 13 y 14 para el caso de desplegar la rejilla en $\pi/6$. Los resultados son similares a los obtenidos para el caso de 81 usuarios en cada macrocelda. Hay que notar que la ligera degradación que se producía en el esquema 13 en el despliegue en $\pi/6$ en este caso es menos visible, ya que al haber más usuarios en la macrocelda se han igualado las condiciones de interferencias para la posición en cero y en $\pi/6$.

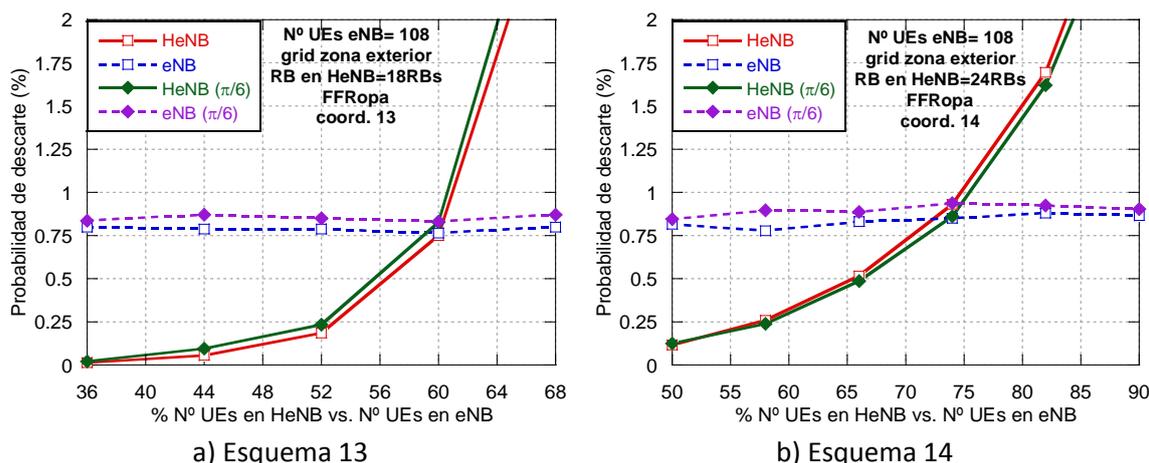


Figura 45. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y dirección de máxima radiación

En la Figura 46 se muestran los resultados para el despliegue de la rejilla en la frontera entre los sectores 0 y 2. Se pueden extraer las mismas conclusiones que las explicadas para el caso de 81 usuarios en cada macrocelda ya que los resultados son similares. Cabe destacar que el esquema 16 se comporta algo mejor que el 14 para situaciones de baja carga de la femtocelda.

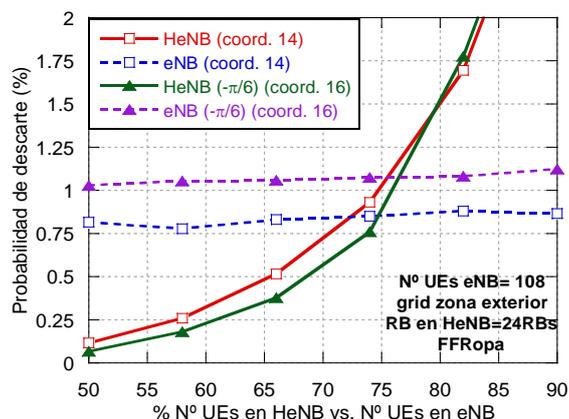


Figura 46. Probabilidad de descarte de paquetes. 108 UEs en cada macrocelda. Zona exterior y frontera entre dos sectores

A modo de comparación entre el despliegue de la rejilla en la zona interior y el despliegue en la zona exterior podemos observar que los resultados obtenidos para los esquemas 14 (ángulos 0 y $\pi/6$) y 16 (ángulo $-\pi/6$) son muy parecidos, de tal forma que podemos concluir que debido a que en este despliegue los usuarios están situados más cerca de la femtocelda, son menos sensibles a las condiciones de la macrocelda, obteniéndose las mismas capacidades con los mismos esquemas de coordinación tanto en el interior como en el exterior. Sin embargo merece la pena darse cuenta de que cuando la rejilla se despliega en el exterior se produce una degradación de las prestaciones de los usuarios de la macrocelda, especialmente cuando es desplegada en $\pi/6$ y en $-\pi/6$.

5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

El objetivo de este trabajo fin de máster era estudiar, desarrollar y evaluar estrategias de gestión de recursos radio para despliegues heterogéneos. Como ya se ha comentado el estudio se ha centrado en el enlace descendente asumiendo que el duplexado es FDD. Con el fin de evaluar las diferentes estrategias propuestas se han llevado a cabo diversas simulaciones, las cuales se han valorado y analizado en el apartado de resultados.

Para poder evaluar los esquemas propuestos fue necesario modificar la plataforma de simulación propietaria para que se pudiesen llevar a cabo despliegues de femtoceldas sobre una red macrocelular. Concretamente se han implementado dos tipos diferentes de despliegues. En primer lugar se ha llevado a cabo un escenario en el que se despliega una femtocelda en cada una de las 19 macroceldas que forman la red macrocelular, en una posición fija y configurable. Se han llevado a cabo simulaciones variando las posiciones de las femtoceldas. En segundo lugar se ha desarrollado un escenario consistente en desplegar una rejilla de 3x3 femtoceldas en la macrocelda 0 de la red macrocelular. De la misma forma que para el despliegue anterior se han llevado a cabo pruebas colocando la rejilla en diferentes posiciones.

Centrandonos en el despliegue de una femtocelda en cada macrocelda podemos extraer la conclusión de que el factor limitante para maximizar la capacidad de las femtoceldas es el número de RBs del que disponen las mismas. Es decir, para maximizar la capacidad lo más conveniente es permitir que las femtoceldas empleen el mayor número de RBs posibles. Sin embargo también hemos comprobado que cuando las femtoceldas reutilizan la mayor parte de los recursos disponibles en el sistema, se produce una degradación de las prestaciones de los usuarios de las macroceldas. De tal forma que existe un compromiso entre maximizar la capacidad de las femtoceldas y limitar la degradación de la capacidad de las macroceldas.

También se ha podido comprobar que si empleamos esquemas de coordinación en los que las femtoceldas pueden emplear gran parte de los recursos frecuenciales, las femtoceldas situadas en los exteriores de las macroceldas consiguen soportar un mayor número de usuarios que las femtoceldas situadas en las zonas interiores debido a que gozan de mejores condiciones de interferencias. Como contrapartida, las femtoceldas desplegadas en las zonas exteriores degradan en mayor medida las prestaciones de los usuarios de las macroceldas, especialmente las de los situados en los bordes de las macroceldas. También cabe destacar que cuando las femtoceldas son desplegadas en las fronteras entre sectores es necesario aplicar esquemas de coordinación con mayores restricciones para limitar la degradación sobre los usuarios de las macroceldas, de tal forma que las femtoceldas tienen a su disposición menor cantidad de recursos y por lo tanto son capaces de soportar un menor número de usuarios.

Centrandose ahora en el despliegue de una rejilla de 9 femtoceldas en la macrocelda 0, hemos podido evaluar diferentes estrategias de coordinación entre femtoceldas para tratar de minimizar la interferencia. Concretamente, se ha podido observar que de nuevo lo más

beneficioso para maximizar la capacidad de las femtoceldas es pesar esquemas que les permitan emplear a las mismas el mayor número de RBs posibles. Además, de los esquemas de coordinación que se han propuesto, los que mejores resultados han ofrecido han sido los esquemas 14 y 16, en los cuales se ha considerado una máscara de potencia de dos niveles, reservando unos RBs para la zona exterior y otros RBs para la zona interior, y se ha tratado de conseguir un reparto ortogonal entre los RBs prioritarios, que son precisamente los reservados a la zona exterior.

Debido a que en este despliegue se ha considerado que los usuarios están mas cerca de las femtoceldas, los usuarios gozan de buenas condiciones de canal de tal forma que son menos sensibles a las condiciones interferentes de la macrocelda, obteniéndose para los mismos esquemas de coordinación, resultados similares de capacidad de las femtoceldas para despliegues tanto en la zona interior como en la exterior. De hecho las pruebas que se han llevado a cabo empleando el esquema FFR en la macrocelda han mostrado que las femtoceldas no se ven alteradas por la mayor variabilidad de la interferencia en la subbanda interior, empleando esquemas de coordinación que les permiten utilizar dichos RBs, mientras que para el despliegue de una femtocelda en cada macrocelda si que se ha producido una degradación de las prestaciones de las femtoceldas al emplear FFR. Siguiendo en la misma línea, se han realizado pruebas desplegando la rejilla en la frontera entre sectores y permitiendo a las femtoceldas emplear una gran parte de los recursos y las simulaciones han mostrado que las femtoceldas no se ven muy afectadas por encontrarse en la frontera, pero al reutilizar tantos recursos degradan considerablemente las prestaciones de los usuarios de las macroceldas, especialmente si la rejilla está desplegada en la zona exterior.

5.2 Líneas futuras

En este trabajo no se han considerado esquemas de selección de nodo de acceso, por lo que una futura línea de trabajo sería permitir el libre movimiento de los usuarios, de tal forma que los usuarios escogiesen a que nodo conectarse en función de alguna métrica concreta como por ejemplo en función de la potencia recibida de las señales piloto (RSRP: Reference Signal Received Power). Hay que tener en cuenta que los conflictos de interferencia se producen fundamentalmente con los usuarios macrocelulares próximos a la femtocelda. Ligado a esto y dotando de mayor flexibilidad y realismo al problema, el siguiente paso sería proponer estrategias que den soporte a condiciones cambiantes y heterogéneas de distribución de carga dentro del sistema heterogéneo. En definitiva, capaces de adaptarse tanto a las variaciones de carga de la femtocelda como a condiciones cambiantes de distribución de usuarios en la macrocelda.

6. Referencias Bibliográficas

- [1] D. López-Pérez, A. Valcarce, G. de la Roche, J.Zhang, "OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance", IEEE Communications Magazine, Septiembre 2009, pp. 41-48.
- [2] G. Mansfield, "Femtocells in the US Market – Business Drivers and Consumer Proposition", FemtoCells Europe, ATT, Londres, Junio 2008.
- [3] N. Kim, H. Choi, H. Chung, "An Adaptive Hot-Spot Operating Scheme for OFDMA Downlink Systems in Vertically Overlaid Cellular Architecture", ETRI Journal, Volumen 28, Número 3, Junio 2006.
- [4] M. Z. Chowdhury, Y. M. Jang, Z. J. Haas, "Interference Mitigation Using Dynamic Frequency Re-use for Dense Femtocell Network Architectures", Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) Second International Conference, Agosto 2010.
- [5] T. Lee, J. Yoon, S. Lee, J. Shin, "Interference Management in OFDMA Femtocell Systems Using Fractional Frequency Reuse", International Conference on Communications Circuits and Systems (ICCCAS), Julio 2010.
- [6] H. Jung, J. Lee, "Downlink Resource Management for OFDMA Femtocells using Stochastic Subchannel Allocation", 16th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Noviembre 2010.
- [7] X. Chu, Y. Wu, L. Benmesbah, W. Ling, "Resource Allocation in Hybrid Macro/Femto Networks", Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Abril 2010.
- [8] S. Barbarossa, S. Sardellitti, A. Carfagna, P. Vecchiarelli, "Decentralized Interference Management in Femtocells: A Game-Theoretic Approach", Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), Junio 2010.
- [9] R.-T. Juang, P. Ting, H.-P. Lin, D.-B. Lin, "Interference Management of Femtocell in Macro-cellular Networks", Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Abril 2010.
- [10] K. R. Krishnan, H. Luss, "Power Selection for Maximizing SINR in Femtocells for Specified SINR in Macrocell", Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Marzo 2011.
- [11] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, D. I. Kim, "Interference Management in OFDMA Femtocell Networks: Issues and Approaches", 2011.
- [12] S. Guruacharya, D. Niyato, E. Hossain, D.I. Kim, "Hierarchical Competition in Femtocell-Based Cellular Networks", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Diciembre 2010.
- [13] H. Li, X. Xu, D. Hu, X. Qu, X. Tao, P. Zhang, "Graph Method Based Clustering Strategy for Femtocell Interference Management and Spectrum Efficiency Improvement", Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), Septiembre 2010.

[14] L. Zhang, L. Yang, T. Yang, "Cognitive Interference Management for LTE-A Femtocells with Distributed Carrier Selection", Vehicular Technology Conference Fall (VTC Fall), Septiembre 2010.

[15] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, J. Shin, "Interference Management in LTE Femtocell Systems Using Fractional Frequency Reuse", International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Febrero 2010.

[16] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, A. Gatherer, "Femtocell Networks: A Survey", IEEE Communications Magazine, Septiembre 2008, pp. 59-67.

[17] 3GPP, TSG-RAN WG4 #51, R4-092042, "Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements", Alcatel-Lucent, San Francisco, EE.UU, Mayo 2009.