

Israel Guío Muñoz

Gestión de Recursos Radio en
Redes Móviles Celulares Basadas
en Tecnología OFDMA para la
Provisión de QoS y
Control de la Interferencia

Departamento
Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Director/es
Hernández Solana, María Ángela

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

GESTIÓN DE RECURSOS RADIO EN REDES
MÓVILES CELULARES BASADAS EN
TECNOLOGÍA OFDMA PARA LA PROVISIÓN DE
QOS Y
CONTROL DE LA INTERFERENCIA

Autor

Israel Guío Muñoz

Director/es

Hernández Solana, María Ángela

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Universidad de Zaragoza
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones



***Gestión de Recursos Radio en Redes
Móviles Celulares Basadas en Tecnología
OFDMA para la Provisión de QoS y
Control de la Interferencia***

Tesis doctoral

*Doctorado en Tecnologías de la Información y
Comunicaciones en Redes Móviles (TICRM)*

Autor:

Israel Guío Muñoz

Directora:

Dra. Ángela Hernández Solana

Zaragoza, 2013

Agradecimientos

A mi directora Ángela Hernández, por su inestimable ayuda e infinita paciencia durante todo el proceso de elaboración de esta tesis.

A los excompañeros del GTC, por estar siempre dispuestos a echar una mano y por el buen ambiente que creaban cada día.

A los amigos de aquí y de allá, por acompañarme a lo largo de todos estos años y darme el apoyo que necesitaba cuando más lo necesitaba.

A mi familia, y en especial a mis padres, por los esfuerzos realizados y el incondicional apoyo en todo momento.

Sin vosotros, esto no hubiera sido posible. Gracias.

Índice de Contenidos

Lista de Figuras.....	V
Lista de Tablas	XI
Lista de Acrónimos	XIII
1 - Introducción.....	1
1.1 Motivación y objetivos de la tesis	1
1.2 Estructura de la tesis	6
2 - Estado del Arte	9
2.1 Tecnología OFDMA para sistemas móviles de banda ancha	10
2.1.1 Modulación OFDM	11
2.1.2 Acceso Múltiple OFDMA.....	18
2.1.3 Diferencias entre los estándares de comunicaciones móviles de banda ancha basados en OFDMA	23
2.2 Mecanismos de control de la ICI para el enlace descendente	27
2.2.1 Mitigación de interferencias.....	29
2.2.2 Cancelación de interferencias	33
2.2.3 Coordinación de interferencias.....	34
2.3 Scheduling de recursos radio y provisión de QoS.....	62

2.3.1 Propuestas para el Scheduling Frecuencial	72
2.3.2 Propuestas para el Scheduling Temporal.....	80
3 - Propuesta Preliminar de Mecanismos de ICIC y Asignación Dinámica de Subportadoras y Potencia	93
3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura.....	96
3.1.1 Modelo Básico del Sistema	96
3.1.2 Mecanismos de Coordinación de ICI	99
3.1.3 Evaluación de los Mecanismos de Coordinación de ICI.....	105
3.2 Control de la ICI y algoritmos de asignación dinámica de potencia y recursos frecuenciales.....	119
3.2.1 Aspectos Comunes de Diseño para los Algoritmos de Asignación de Recursos	122
3.2.2 Descripción de los Algoritmos de Asignación de Recursos.....	128
3.2.3 Evaluación de prestaciones.....	138
3.3 Comparativa de los mecanismos de control de la ICI y asignación de recursos considerando la evolución temporal del sistema.....	155
3.3.1 Condiciones de simulación.....	158
3.3.2 Resultados de las simulaciones	163
3.4 Conclusiones.....	173
4 - Algoritmos Basados en FFR para la Asignación Dinámica de Potencia, Subportadoras y MCS, y Provisión de QoS	179
4.1 Análisis de la variabilidad de la ICI en sistemas FFR con diferentes mecanismos de CQI.....	182
4.1.1 Algoritmos de asignación de recursos considerados	184
4.1.2 Evaluación de las propuestas	193
4.1.3 Conclusiones.....	202

4.2 Propuesta de algoritmos de asignación de recursos radio basados en el esquema FFR.....	203
4.2.1 Algoritmos basados en FFR para la asignación de recursos.....	205
4.2.2 Condiciones de simulación	218
4.2.3 Resultados de las simulaciones.....	222
4.2.4 Conclusiones	237
4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS	238
4.3.1 Estrategias de scheduling temporal	238
4.3.2 Escenario con un solo tipo de servicio.....	240
4.3.3 Escenario con dos tipos de servicio	248
4.4 Conclusiones	255
5 - Reúso Intensivo de Recursos Radio dentro de la Celda	257
5.1 Evaluación preliminar de la potencialidad del reúso unidad a nivel de sector	261
5.1.1 Resultados de la evaluación preliminar.....	263
5.2 Propuestas específicas para la asignación de recursos con reúso unidad a nivel de sector	269
5.2.1 Usuarios fronterizos como usuarios exteriores.....	270
5.2.2 Usuarios fronterizos en una subbanda específica	271
5.2.3 Usuarios fronterizos en la subbanda interior	274
5.3 Evaluación de los algoritmos de asignación de recursos con reúso unidad a nivel de sector	281
5.3.1 Condiciones de simulación.....	281
5.3.2 Resultados de las simulaciones.....	282
5.4 Conclusiones	288
6 - Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación	291
6.1 Conclusiones	291
6.1.1 Coordinación de interferencias y algoritmos de asignación de recursos radio.....	293

6.1.2	Provisión de QoS	295
6.2	Líneas futuras de investigación.....	296
6.2.1	Algoritmos de asignación para incrementar la capacidad del sistema	296
6.2.2	Algoritmos de control de admisión y congestión para redes OFDMA	297
Anexo - Publicaciones y Participación en Proyectos de I+D		299
A.1	Listado de publicaciones	299
A.2	Participación en proyectos de I+D relacionados con la tesis.....	303
Bibliografía		305

Lista de Figuras

Figura 2.1: Espectro de una subportadora OFDM con conformado rectangular.....	11
Figura 2.2: Espectro de una señal OFDM	12
Figura 2.3: Esquema del modulador (a) y demodulador (b) OFDM	13
Figura 2.4: Generación del prefijo cíclico.....	15
Figura 2.5: Utilidad del prefijo cíclico para absorber las réplicas del canal	16
Figura 2.6: Esquema del espectro en banda base de una señal OFDM.....	17
Figura 2.7: Aplicación de la diversidad multiusuario	19
Figura 2.8: Distintos mapeados de subportadoras en RBs.....	20
Figura 2.9: Ejemplo del mapa tiempo-frecuencia en una comunicación OFDMA.....	21
Figura 2.10: Estructura de trama en LTE.....	26
Figura 2.11: Ejemplo de Frequency Hopping	31
Figura 2.12: Esquema del demodulador IDMA.....	34
Figura 2.13: Despliegue con tri-sectorización y reuso $N_{sb}=7$	39
Figura 2.14: Sectorización con 8 sectores asignando por parejas.....	40
Figura 2.15: Esquemas de sectorización flexible	42

Figura 2.16: Asignación de RBs por potencia requerida por los UEs.....	44
Figura 2.17: Sectorización con máscaras a nivel de celda.....	45
Figura 2.18: Esquemas FFR típicos para redes OFDMA	46
Figura 2.19: Esquemas FFR con menor reuso en la subbanda exterior	49
Figura 2.20: Esquemas FFR con zona adicional de reuso en el exterior.....	50
Figura 2.21: Esquemas FFR con zona adicional de reuso por ICI dominante	51
Figura 2.22: Esquemas FFR en frecuencia con mapeado distribuido.....	52
Figura 2.23: Esquema FFR en tiempo	53
Figura 2.24: FFR con sectorización flexible en la subbanda interior	54
Figura 2.25: Ajuste dinámico de la subbanda exterior en FFR	55
Figura 2.26: Distinto orden en la asignación y ocupación de la subbanda exterior	58
Figura 2.27: FFR para reuso a nivel de sector.....	59
Figura 2.28: Modelo general de un algoritmo de scheduling completo.....	64
Figura 2.29: Funciones de urgencia hard y soft deadline.....	87
Figura 2.30: Ejemplo de función de urgencia adaptativa.....	88
Figura 3.1: Patrón de radiación de la antena panel.....	97
Figura 3.2: Configuraciones más comunes para el despliegue de sectores.....	98
Figura 3.3: Entramado de la comunicación en el downlink	99
Figura 3.4: Esquema de coordinación FFR clásico.....	101
Figura 3.5: Esquema de sectorización frecuencial clásica	102
Figura 3.6: Sectorización frecuencial con máscaras de potencia a nivel de sector	103

Figura 3.7: Sectorización frecuencial con máscaras de potencia a nivel de celda.....	104
Figura 3.8: Trayectorias para la evaluación de mecanismos de coordinación .	106
Figura 3.9: Técnica de wrap-around	107
Figura 3.10: Señal útil (azul) e interferentes (rojo) del primer anillo	108
Figura 3.11: Ejemplo de propagación multicamino	111
Figura 3.12: SINR recibida para los distintos mecanismos de coordinación	116
Figura 3.13: Desviación típica de la SINR en la trayectoria 1	118
Figura 3.14: Permutación de asignaciones en FFS_3LevelMask_min.....	136
Figura 3.15: Distribución heterogénea de usuarios.....	140
Figura 3.16: PDF (a) y CDF (b) de la SINR en cada zona con carga homogénea	147
Figura 3.17: PDF (a) y CDF (b) de la SINR para el 5-percentil de peores usuarios	149
Figura 3.18: CDF de la SINR para FFS_3LevelMask_Min con y sin permutación	150
Figura 3.19: CDF de la SINR en cada zona con carga heterogénea	153
Figura 3.20: Comparación de la PDF de la SINR para 3km/h	167
Figura 3.21: Desglose de la SINR para FFS_3LevelMask_Min en la zona 2....	169
Figura 3.22: Comparación de la PDF de la SINR para 120km/h.....	171
Figura 4.1: Esquema básico de envío de CQIs.....	183
Figura 4.2: Esquema FFR con sectorización en el exterior.....	185
Figura 4.3: Ordenación en la asignación de RBs para FFRo	190
Figura 4.4: Ejemplo de ordenación para el algoritmo FFRo en la subbanda interior.....	191

Figura 4.5: Porcentaje de asignación de cada RB en la subbanda interior	195
Figura 4.6: Error de interferencia en FFR para diferentes formatos de CQI....	198
Figura 4.7: CDF del error de interferencia en FFR.....	199
Figura 4.8: Error de interferencia en FFRo para diferentes formatos de CQI.	200
Figura 4.9: CDF del error de interferencia en FFRo.....	201
Figura 4.10: Error de interferencia en FFR con alta carga	202
Figura 4.11: Asignación dinámica de potencia en FFRopa	208
Figura 4.12: Descarte de TUs para las distintas opciones de los algoritmos....	224
Figura 4.13: Descarte de TUs para los algoritmos considerados.....	226
Figura 4.14: Descarte de TUs en la zona exterior	227
Figura 4.15: Tasa de RBs asignados en cada zona para FFRopa	229
Figura 4.16: Retardo medio de TUs para los algoritmos considerados.....	231
Figura 4.17: Porcentaje de RBs no asignados	232
Figura 4.18: Porcentaje de asignación de cada MCS	233
Figura 4.19: BLER en la celda y por zonas para FFR y FFRopa	235
Figura 4.20: Tasa de descarte de TUs para una mayor carga del sistema	236
Figura 4.21: FFR vs. FFRopa para cada estrategia de scheduling temporal	242
Figura 4.22: Asignación de RBs en cada zona para EDF y EXP	243
Figura 4.23: Comparación del descarte para las estrategias de scheduling temporal	244
Figura 4.24: Comportamiento de Tasa, EDF y M-LDF con alta carga	244
Figura 4.25: Número medio de TUs en cola para FFRopa	245
Figura 4.26: Comparación de las estrategias de scheduling temporal con baja carga	246

Figura 4.27: Comparación del retardo para las estrategias de scheduling temporal	247
Figura 4.28: Tasa de descarte para ambos servicios con FFR y FFRopa	250
Figura 4.29: Número medio de TUs para cada servicio y zona con FFRopa....	252
Figura 4.30: Retardo promedio de TUs para ambos servicios con FFR y FFRopa	254
Figura 5.1: Prestaciones en el descarte de TUs al aplicar reúso a nivel de sector	266
Figura 5.2: Impacto de la ordenación en el reúso unidad a nivel de sector	267
Figura 5.3: Comparación entre FFRopa-RB-R y FFRopa-MCS-R.....	268
Figura 5.4: Definición de la zona de frontera.....	269
Figura 5.5: Esquema de despliegue del algoritmos FSRopa	271
Figura 5.6: Definición de subbandas en el algoritmos FSRopa-FS_Sec	272
Figura 5.7: Definición de subbandas en el algoritmos FSRopa-FS_Est.....	273
Figura 5.8: Esquema de despliegue del algoritmo FSRopa-VF	275
Figura 5.9: RBs asignables en el interior y frontera con FSRopa-VF en cada sector	276
Figura 5.10: RBs asignables en el exterior y en la frontera con FSRopa-VF	277
Figura 5.11: Ejemplos de asignación de RBs para las variantes de FSRopa-VF	278
Figura 5.12: Tasa de descarte para los algoritmos FSRopa y FSRopa-FS	283
Figura 5.13: Tasa de BLER para los usuarios de frontera en FSRopa y FSRopa-FS.....	284
Figura 5.14: Tasa de descarte para los algoritmos FSRopa-VF.....	285
Figura 5.15: Ganancia en capacidad al aplicar reúso a nivel de sector	286

Figura 5.16: Satisfacción de tasa para algoritmos de reúso unidad a nivel de sector 287

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Numerología para WiMAX móvil (PUSC) y LTE a 5MHz.....	18
Tabla 3.1: Pedestrian-A extendido (3km/h).....	111
Tabla 3.2: Typical Urban extendido (120km/h).....	112
Tabla 3.3: Parámetros de simulación	114
Tabla 3.4: Valores de las máscaras de potencia (dBm/RB)	115
Tabla 3.5: Parámetros relacionados con los UEs	126
Tabla 3.6: Parámetros relacionados con los RBs	127
Tabla 3.7: Parámetros relacionados con la potencia.....	127
Tabla 3.8: Parámetros adicionales de simulación.....	141
Tabla 3.9: Máscaras de potencia para los algoritmos FFS y AFS	143
Tabla 3.10: Máscaras de potencia para FFR_cell2mask.....	143
Tabla 3.11: Porcentajes de acceso con carga homogénea	145
Tabla 3.12: Porcentajes de acceso con carga heterogénea	151
Tabla 3.13: Parámetros del modelo de tráfico	159
Tabla 3.14: Porcentajes de asignación para cada algoritmo a 3km/h	165
Tabla 3.15: Porcentajes de asignación para cada algoritmo a 120km/h.....	170

Tabla 4.1: Máscaras de potencia para los algoritmos basados en FFR.....	194
Tabla 4.2: Parámetros generales del sistema.....	220
Tabla 4.3: Capacidad de la celda para cada algoritmo.....	229
Tabla 4.4: Comparativa de FFR y FFRopa (Capacidad / Retardo promedio)..	248
Tabla 4.5: Capacidad con FFR y FFRopa para dos servicios	250
Tabla 5.1: Máscaras de potencia para reúso unidad a nivel de celda	265
Tabla 5.2: Máscaras de potencia para reúso unidad a nivel de sector.....	265
Tabla 5.3: Máscaras de potencia para el algoritmo FSRopa.....	282
Tabla 5.4: Máscaras de potencia para los algoritmos FSRopa-FS.....	282
Tabla 5.5: Máscaras de potencia para los algoritmos FSRopa-VF	282

Lista de Acrónimos

3GPP	3 rd Group Partnership Project
AFS	Adaptive Frequency Sectorization
ARQ	Automatic Request Response
BLER	Block Error Rate
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
C³WPF	Class and Channel Condition Weighted Proportionally Fair Scheduler
CDF	Cumulative Density Function
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CSI	Channel State Information
DC	Direct Current
DFT	Discrete Fourier Transform
EDF	Earliest Deadline First
EXP	Exponential Rule

FD	Frequency Domain
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplex
FFR	Fractional Frequency Reuse
FFT	Fast Fourier Transform
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HoL	Head of Line
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IDMA	Interleave Division Multiple Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
ISD	Inter-Site Distance
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLWDF	Modified Largest Weighted Delay First
MMPF	Modified Multistream Proportional Fair
M-LDF	Modified Largest Delay First

NACK	Not Acknowledge
NPU	Non-Prioritary User
nRT	Non-Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OWFQ	Opportunistic Weighted Fair Queueing
PDF	Probability Density Function
PDOR	Packet Delay Outage Ratio
PF	Proportional Fair
POD	Phase Offset Diversity
PU	Prioritary User
PUSC	Partial Usage Subchannelization
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RNC	Radio Network Controller
RT	Real Time
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TD	Time Domain
TDD	Time Division Duplex

TDOA	Time Difference Of Arrival
TTI	Transmission Time Interval
TU	Transport Unit
UE	User Equipment
UEPS	Urgency and Efficiency Based Packet Scheduling
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wireless Code Division Multiple Access
WFQ	Weighted Fair Queueing
WFO	Weighted Fair Opportunistic
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y objetivos de la tesis

Las comunicaciones móviles han experimentado un crecimiento significativo en los últimos tiempos gracias a que son capaces de proveer de servicios de comunicaciones a los usuarios en cualquier lugar y en condiciones de movilidad, funcionalidades que son muy valoradas por los usuarios. Por su parte, los usuarios demandan servicios cada vez más restrictivos y con mayores requisitos para la red. Desde las primeras redes móviles, en las que el tráfico cursado era básicamente de voz, se ha pasado a redes de alta capacidad en las que la voz es simplemente uno más de los múltiples servicios ofrecidos: tráfico de datos, videoconferencia, videostreaming, etc. Cada uno de los estos servicios presenta unos requisitos específicos en cuanto a tasa promedio o retardo de los paquetes. El cumplimiento de estos requisitos determina la satisfacción que los usuarios obtienen de los servicios proporcionados.

El crecimiento en el tráfico demandado por los usuarios a través de las redes móviles, así como las diferentes tipologías del mismo, requiere del diseño de tecnologías de transmisión y procedimientos cada vez más eficientes y versátiles

para dar soporte a dicho crecimiento de la demanda. Solo a modo de ejemplo, en pocos años se ha pasado de sistemas con conmutación de circuitos, donde la reserva de recursos para la transferencia de información se realizaba al inicio de la conexión y se mantenía hasta el fin de esta, a sistemas con multiplexación estadística de paquetes, que permiten gestionar más eficientemente los escasos recursos disponibles y aumentar el número de usuarios soportados. Y lo mismo sucede con las tecnologías de acceso radio, donde la búsqueda de la máxima utilización del espectro disponible lleva a diseñar tecnologías de banda ancha cada vez más complejas que permitan cursar una gran tasa de datos y a usuarios en muy distintas condiciones, al tiempo que se requiere una gran flexibilidad en lo que se refiere a la gestión de recursos radio para poder adaptarse así a la naturaleza cambiante de la carga de la red, tanto en volumen como en distribución de la misma. En este sentido, las soluciones tecnológicas que se están imponiendo en los nuevos sistemas móviles de banda ancha están basadas en la técnica de capa física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), y su correspondiente esquema de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Esta tecnología es muy robusta frente al problema de la propagación multicamino, permite un uso eficiente del espectro y ofrece gran flexibilidad en la gestión de los recursos radio. Sin embargo, para que un sistema basado en OFDMA resulte verdaderamente eficiente, es preciso diseñar procedimientos de gestión de recursos radio y acceso al medio (MAC: *Medium Access Control*) que aprovechen dicha flexibilidad para obtener la máxima utilización del espectro disponible y dar servicio a un gran número de usuarios (UE: *User Equipment*) con diferentes tipos de servicios.

El espectro disponible para las comunicaciones radio es un bien muy escaso. Para dar cabida a la alta demanda de tráfico por parte de los usuarios es necesario aplicar esquemas agresivos de reuso por el que las estaciones base (BS: *Base Station*) reutilizan los recursos radio de otras celdas vecinas. En concreto, los sistemas modernos pretenden maximizar el uso del espectro tomando como

premisa un despliegue con reuso frecuencial unidad, es decir, todas las celdas del escenario comparten el mismo ancho de banda y generan interferencias mutuas. Aparecerá por tanto una fuerte componente de interferencia intercelular (ICI: *Inter-Cell Interference*), que degrada enormemente la calidad de la señal recibida por los usuarios, y especialmente de aquellos situados en el exterior de la celda. La tasa de error en el bloque (BLER: *Block Error Rate*) observada por los usuarios es tan elevada que impide el mantenimiento de la comunicación. Resulta imprescindible por tanto la aplicación de técnicas de gestión de la ICI de modo que las condiciones observadas por estos usuarios mejoren y sea viable mantener una comunicación a través del interfaz radio.

Otras propuestas van más allá y proponen un reuso más intensivo de recursos, de modo que cada recurso frecuencial puede ser asignado una vez por cada sector de la celda. En estos casos, las asignaciones dentro de la celda dejan de ser ortogonales y aparece una componente de interferencia intersector que afectará especialmente a los usuarios situados en la frontera entre sectores de la misma celda. De forma análoga al caso de la ICI, será preciso aplicar esquemas de coordinación de interferencias que mejoren las condiciones de canal de estos usuarios y permitan mejorar sus prestaciones.

Además del mecanismo de control de interferencias aplicado, el aspecto que más influye en las prestaciones finales alcanzadas en la celda es el algoritmo de asignación dinámica de recursos radio: al inicio de cada nuevo intervalo de transmisión (TTI: *Transmission Time Interval*), la celda debe tomar las decisiones correspondientes al reparto de los recursos radio disponibles entre los usuarios con tráfico activo. Generalmente, la tarea de la asignación de recursos radio puede dividirse en dos bloques: por una parte, el scheduling frecuencial se encarga del reparto de los recursos radio para obtener el máximo provecho de la diversidad multicanal y multiusuario. Por otro lado, el scheduler temporal es el encargado de establecer la prioridad de las distintas conexiones

de datos para satisfacer los requerimientos de calidad de servicio (QoS: *Quality of Service*) de los distintos servicios.

Existe una gran cantidad de factores que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar una asignación de recursos que resulte realmente eficiente, tanto desde el punto de vista de utilización máxima del espectro como de satisfacción de la QoS. En primer lugar, la celda deberá considerar las restricciones impuestas por el mecanismo concreto de control de interferencias, que afectan a la libertad en la asignación de determinados recursos radio a los usuarios dependiendo de su ubicación dentro de la propia celda o de sus condiciones particulares de canal. Del mismo modo, para que un algoritmo de asignación de recursos sea realmente eficiente, deberá considerar el estado de canal a cada uno de los usuarios para realizar un reparto óptimo de los recursos, por lo que se precisan medidas de calidad del enlace (CQI: *Channel Quality Indicator*). En base a estas medidas, el scheduler determina en qué recursos frecuenciales es más conveniente asignar al usuario y fija la potencia de transmisión y el esquema de modulación y codificación (MCS: *Modulation and Coding Scheme*) más adecuados. El objetivo de la adaptación de potencia y/o tasa es proporcionar una determinada relación señal a interferencia y ruido (SINR: *Signal to Interference and Noise Ratio*) objetivo en recepción de modo que el usuario sea capaz de demodular el flujo de datos garantizando una cota deseada en la probabilidad de error de recepción de paquete.

Por otra parte, cada flujo de datos tiene asociados unos requerimientos de QoS específicos del servicio que deben satisfacerse, como pueden ser la tasa promedio o el retardo máximo en la transmisión de los paquetes de datos. Estos requisitos deberán ser considerados a la hora de asignar recursos pues la satisfacción de los usuarios, es decir, el cumplimiento de los requisitos de QoS, es el factor que determina las prestaciones finales ofrecidas por el sistema. En términos generales, el scheduling temporal se encarga de la provisión de QoS a

los distintos flujos de datos en base a establecer distintas prioridades de asignación a cada uno de ellos atendiendo al grado de satisfacción de los requisitos de QoS: más prioridad de asignación se otorga al flujo de datos que menor satisfacción de QoS presenta, lo que le ofrece mayores posibilidades de recibir recursos en el presente TTI y mejorar así su satisfacción de QoS.

En cualquier caso, existe una clara interrelación entre la componente frecuencial y temporal del scheduling: las prestaciones que proporcionarán las distintas estrategias de scheduling temporal dependerán en gran medida de la accesibilidad y calidad del enlace que sea capaz de ofrecer el algoritmo de scheduling frecuencial. Y del mismo modo, la elección de los recursos frecuenciales, potencia de transmisión y tasa a asignar en un momento dado dependerá de la conexión seleccionada por el scheduling temporal. Aunque muchas propuestas consideran las tareas de scheduling frecuencial y temporal como dos ítems independientes, solo cuando se diseñan algoritmos que tengan en cuenta sus interdependencias será posible obtener un uso eficiente del espectro radio disponible.

En resumen, en el diseño de algoritmos de asignación de recursos hay que tomar en consideración un gran número de factores para obtener unas prestaciones realmente buenas en términos de satisfacción de los usuarios. Se trata por tanto de una tarea verdaderamente compleja y de ahí que el esfuerzo investigador invertido en dicha temática sea también considerable. En este contexto, el objetivo fundamental de esta tesis es el diseño y evaluación de algoritmos de asignación dinámica de recursos radio del enlace descendente para el control de la interferencia y provisión de QoS en el enlace radio. De forma resumida, los problemas analizados son: la gestión de interferencias intercelulares (en el caso de considerar sistema de reuso frecuencial total a nivel de celda) e intersector (en el caso de considerar reuso unidad en cada sector) en redes OFDM monoportadora, la asignación adaptativa de potencia y frecuencias,

los mecanismos de adaptación del enlace para ajustar la transmisión a las condiciones particulares del usuario y el scheduling temporal en distintos escenarios de tráfico.

Para la evaluación de las distintas propuestas presentadas a lo largo de esta tesis se ha desarrollado un simulador de sistema en C++ capaz de modelar de forma realista los distintos aspectos que tienen influencia en la gestión de recursos radio para el enlace descendente, como pueden ser el modelo de canal, el modelo de movilidad de los terminales, los mecanismos de información de calidad del enlace o el modelo de tráfico. Para disponer de una mayor flexibilidad en cuanto a la implementación y evaluación de los distintos aspectos considerados en esta tesis, la plataforma de simulación ha sido desarrollada completamente como parte del trabajo realizado en la tesis.

1.2 Estructura de la tesis

El contenido de la tesis se estructura en los siguientes capítulos:

El capítulo 2 presenta en primer lugar una breve descripción de la tecnología OFDMA y de los dos sistemas actuales más importantes que hacen uso de ella para dar servicio de banda ancha en redes móviles celulares, como son WiMAX y LTE. Posteriormente se ofrece una revisión del estado del arte en lo que se refiere al control de la interferencia intercelular y de la asignación dinámica de recursos radio para la provisión de QoS en redes móviles de banda ancha basadas en tecnología OFDMA. Las conclusiones de esta revisión servirán de punto de partida para el trabajo realizado en esta tesis.

Basado en el análisis anterior, en el capítulo 3 se realizará una evaluación de distintos esquemas de coordinación de interferencias en escenarios simplificados. Se propondrán y evaluarán a su vez una serie de algoritmos de asignación de subportadoras y potencia que trabajan bajo los esquemas de

coordinación considerados como más interesantes. El objetivo de este capítulo, aunque acotado ya que no se considera la satisfacción de los parámetros de QoS relativos al modelo de tráfico, es extraer las principales conclusiones sobre las distintas propuestas presentadas para el desarrollo posterior de algoritmos más completos y robustos de gestión de recursos en sistemas móviles OFDMA.

El capítulo 4 recoge el grueso de las propuestas sobre la asignación de recursos radio en redes OFDMA para el control de la interferencia y provisión de QoS. Se analizarán una serie de alternativas dentro de este contexto con el fin de encontrar la configuración que ofrece unas mejores prestaciones globales en términos de satisfacción de los usuarios. Las simulaciones presentadas asumirán un modelo completo del sistema que contempla de forma realista los distintos aspectos que mayor impacto tienen sobre la asignación de recursos.

El capítulo 5 supone una extensión del capítulo anterior considerando esta vez esquemas de reuso intensivo de los recursos radio dentro de la celda. En este caso, los recursos frecuenciales podrán ser utilizados varias veces dentro de la celda, es decir, en los distintos sectores de la misma, lo que aumentará la capacidad de la celda pero provocará la aparición de interferencia intracelular.

Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las principales conclusiones de este trabajo así como las futuras líneas de investigación que se plantean.

Capítulo 2

Estado del Arte

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de algoritmos de asignación de recursos radio para el control de la interferencia intercelular (ICI) y provisión de QoS en el enlace descendente en el contexto de redes móviles de banda ancha basadas en tecnología OFDMA. Dado que la ICI (y en su caso la interferencia intersector) es un factor limitante en las prestaciones ofrecidas por los algoritmos de asignación de recursos, en el diseño de los mismos se prestará especial atención al control de la interferencia generada a otras celdas. Para contextualizar el trabajo realizado en esta tesis, se presenta a continuación una revisión bibliográfica general del entorno de las redes de banda ancha basadas en OFDMA. En primer lugar se realizará una breve descripción de dicha tecnología radio, para centrarnos a continuación en los mecanismos de control de la ICI más destacados, estudiando sus prestaciones tanto en términos de calidad de señal como de accesibilidad a los recursos, y analizar después distintas propuestas existentes en lo que se refiere a la asignación de recursos radio en redes de alta capacidad.

2.1 Tecnología OFDMA para sistemas móviles de banda ancha

La tecnología OFDMA se ha convertido en el estándar de facto para las redes móviles de banda ancha puesto que presenta un buen número de características que la hacen adecuada para este tipo de sistemas. Dicha tecnología se aplica con ligeras modificaciones en los sistemas WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), tanto en su versión para terminales fijos [IEEE 802.16 Working Group, 2004] como para terminales móviles [IEEE 802.16 Working Group, 2005], en el sistema LTE (*Long Term Evolution*) [TS36.211, 2009], así como en el sistema WiBro [Korean Telecommunication Technology Association, 2004] desarrollado en Corea y en UMB (*Ultra Mobile Broadband*) [3GPP2 Technical Specification Group C, 2008], creado por el 3GPP2 como evolución de CDMA2000. Estos dos últimos sistemas han perdido importancia debido a la aceptación general que tienen los sistemas WiMAX y LTE en todo mundo, que se han convertido en los estándares principales para los futuros sistemas móviles de banda ancha OFDMA.

A grandes rasgos, la tecnología de acceso OFDMA, que se deriva de la modulación OFDM, se basa en dividir el ancho de banda total del sistema en un número elevado de subportadoras que cumplen con determinadas propiedades de ortogonalidad entre ellas. Cada una de estas subportadoras transporta un símbolo de datos distinto, lo que permite adaptar la transmisión de cada símbolo a las condiciones de canal y combatir mejor los efectos de la propagación multicamino. Por otra parte, la ortogonalidad evita la aparición de interferencia entre subportadoras adyacentes y elimina la necesidad de bandas de guarda, mejorando la eficiencia espectral frente a soluciones tipo FDM. Estas ventajas, propias de OFDM, se extienden al aplicar esquema de acceso múltiple OFDMA, que permite transmitir simultáneamente información de los distintos usuarios móviles que comparten el canal repartiendo entre ellos las

subportadoras existentes en cada símbolo temporal. A efectos prácticos, se crea una estructura de recursos en 2 dimensiones (tiempo y frecuencia) que el nivel de control de acceso al medio (MAC) deberá repartir entre los usuarios de la forma más eficiente posible. Se analizan a continuación con mayor detalle las características específicas de OFDMA y derivadas de OFDM.

2.1.1 Modulación OFDM

La modulación OFDM puede verse como un caso especial de modulación multiportadora en la que las subportadoras se definen de tal forma que presentan ortogonalidad entre ellas. El flujo de datos de alta velocidad se divide en N_C flujos de menor tasa que son transmitidos en paralelo en las N_C subportadoras. Esto hace que la duración neta del símbolo que viaja en cada subportadora sea mayor y así es más robusto frente a variaciones del canal.

El conformado de los símbolos modulados es tan simple como un pulso rectangular, cuya duración (T_b) determina el tiempo que compone un símbolo de datos. Este conformado implica que en frecuencia, cada subportadora será una *Sinc* al cuadrado, tal y como se muestra en la Figura 2.1 y se describe en la ecuación (2.1).

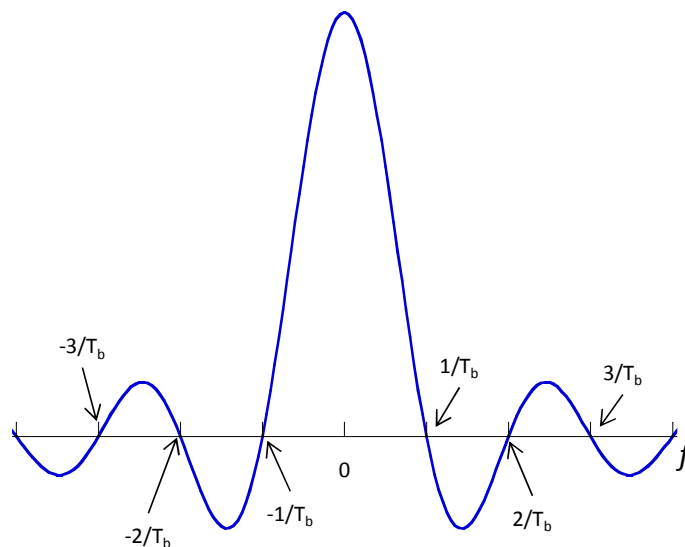


Figura 2.1: Espectro de una subportadora OFDM con conformado rectangular

$$P(f) = (\text{Sinc}(\pi \cdot T_b \cdot f))^2 = \left(\frac{\text{sen}(\pi \cdot T_b \cdot f)}{\pi \cdot T_b \cdot f} \right)^2 \quad (2.1)$$

Como se puede comprobar en la Figura 2.1, el espectro de una subportadora presenta un cero de potencia en los valores múltiplos de $1/T_b$ distintos de cero. Por tanto, se pueden transmitir simultáneamente y sin interferencia mutua distintas subportadoras siempre y cuando la separación entre ellas Δf sea múltiplo de $1/T_b$, como se muestra en la Figura 2.2. Esta forma de modular proporciona un mayor aprovechamiento del espectro puesto que las subportadoras presentan realmente solapamiento en frecuencia. Lógicamente, la pérdida de ortogonalidad entre las subportadoras, debida por ejemplo a imperfecciones de los equipos o a efectos del canal que se describen más adelante, supone que las subportadoras comienzan a interferirse entre ellas, lo que se denomina interferencia intersimbólica. Esto provoca un aumento de la tasa de error en la demodulación de los símbolos de datos.

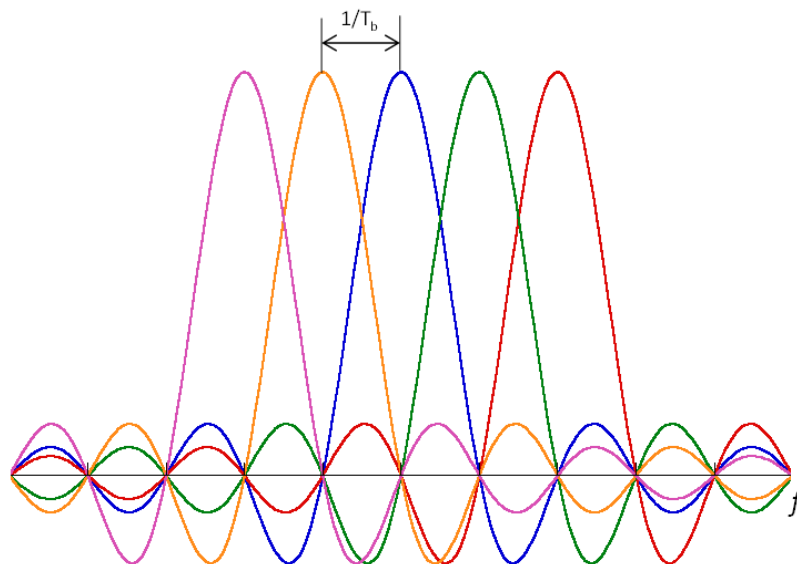
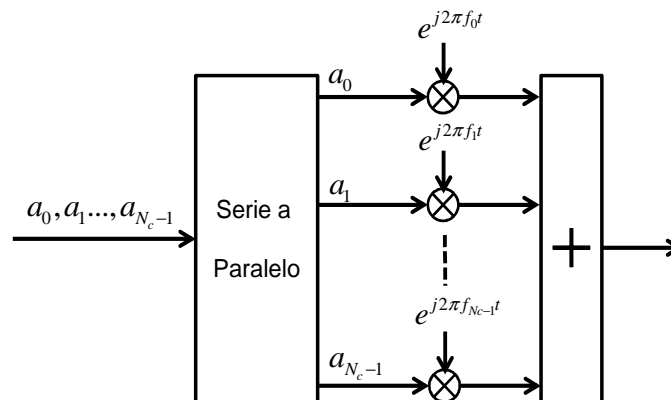


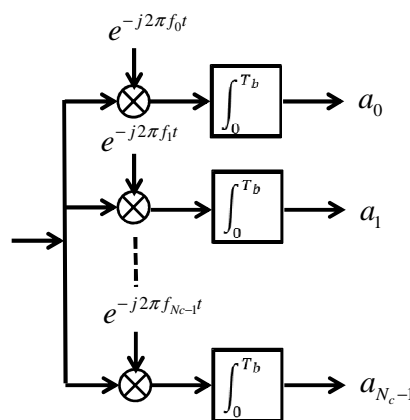
Figura 2.2: Espectro de una señal OFDM

De forma esquemática, la estructura de un modulador y un demodulador OFDM básico se muestra en la Figura 2.3. La secuencia de símbolos de datos a_j se separa en N_c flujos paralelos que se modulan con la frecuencia f_j

correspondiente y se suman para obtener el símbolo OFDM transmitido. Por tanto, la señal OFDM puede verse como una suma de N_C sinusoides de duración T_b segundos, cada una de las cuales se multiplica por un símbolo complejo de la modulación considerada. Del mismo modo, el demodulador multiplica el símbolo OFDM recibido por cada una de las sinusoides y realiza la integración en el periodo de duración del símbolo (T_b). Gracias a las restricciones impuestas en cuanto a la separación frecuencial entre subportadoras, durante el periodo de integración T_b existe un número entero de periodos de cada una de las sinusoides. Así, al multiplicar en cada rama por una senoide e integrar, las componentes del resto de subportadoras quedan anuladas y se recupera en cada rama el símbolo a_j transmitido en la subportadora correspondiente.



a) Modificador OFDM



b) Demodulador OFDM

Figura 2.3: Esquema del modificador (a) y demodulador (b) OFDM

Las propiedades especiales de la señal OFDM hacen que las estructuras de modulación y demodulación puedan implementarse digitalmente de forma sencilla y eficiente mediante la transformada rápida de Fourier (FFT: *Fast Fourier Transform*) para la demodulación y su correspondiente operador inverso transformada inversa rápida de Fourier (IFFT: *Inverse Fast Fourier Transform*) para el proceso de modulación. Para poder utilizar estos operadores deben satisfacerse las siguientes condiciones: el número total de subportadoras existente en el sistema (N_C) debe ser una potencia de 2, de modo que se pueda aplicar algoritmo de *lazo mariposa* para la computación rápida de dicha transformada [Oppenheim y otros, 1989]; y la frecuencia de muestreo de la señal OFDM (f_s) ha de ser múltiplo de la separación frecuencial entre subportadoras.

Además de los efectos clásicos que el canal tiene en señales transmitidas a través del medio radio, como son el ruido térmico o las pérdidas de propagación por citar algunos, en la señal OFDM tienen especial importancia dos aspectos del canal: el efecto Doppler y la propagación multicamino. En primer lugar, la velocidad relativa de desplazamiento entre el emisor y el receptor de la señal provoca un batido aleatorio de sus componentes frecuenciales conocido como efecto Doppler [Stüber, 2001]. El rango de posible desviación de dichas componentes frecuenciales crece con la velocidad de desplazamiento. En el caso de la modulación OFDM, el efecto Doppler se traduce en una pérdida de la ortogonalidad entre subportadoras al modificarse la separación entre ellas, lo que provoca un aumento de la tasa de error. La tolerancia al efecto Doppler para el rango de velocidades de desplazamiento considerado en el sistema es un parámetro importante a la hora de determinar la separación frecuencial entre subportadoras, pues a menor separación, mayor es el impacto del efecto Doppler [R1-050368, 2005; R1-063107, 2006].

El efecto de la propagación multicamino en la señal OFDM se manifiesta en la pérdida en el dominio frecuencial de la ortogonalidad de las subportadoras debido al retraso temporal entre las distintas réplicas de la señal recibidas y la aparición de interferencia intersimbólica en el dominio temporal. En cada símbolo OFDM, la sinusoide correspondiente a cada subportadora va multiplicada por el símbolo complejo de datos transmitido, por lo que entre dos símbolos OFDM consecutivos es probable que se produzcan saltos tanto en amplitud como en fase de estas sinusoides. Cuando se recibe una réplica de la señal con distinto retardo, esta discontinuidad de amplitud y fase se produce durante el periodo de integración en el receptor, con lo que las subportadoras dejan de ser ortogonales y se produce un error en la detección del símbolo transmitido en cada subportadora. Para evitar este efecto, en el símbolo OFDM se inserta un prefijo cíclico (CP: *Cyclic Prefix*) al inicio del símbolo, generado copiando los últimos T_g segundos del símbolo OFDM (Figura 2.4).

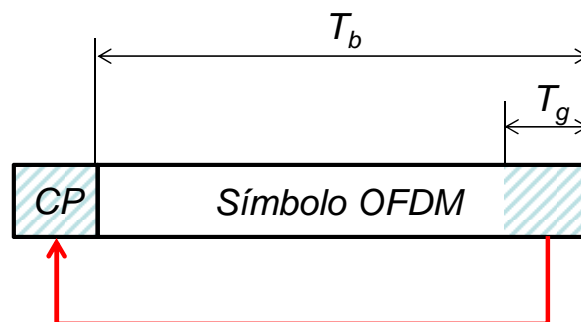


Figura 2.4: Generación del prefijo cíclico

Como resultado de la propagación multicamino, el receptor recibe varias réplicas de la señal con diferente retardo y potencia. En el caso de OFDM, las réplicas que lleguen al receptor con un retardo inferior a la duración del CP no provocarán saltos de amplitud y fase durante el periodo de integración. Además, al utilizar una copia de la parte final del símbolo OFDM para generar el CP, nos aseguramos de que las componentes de dichas réplicas en cada subportadora comprendan un número entero de periodos y, por tanto, al ser integradas junto

con las del rayo principal, mejoran la recepción del símbolo recibido. Un ejemplo visual de dicho efecto puede verse en la Figura 2.5, donde por simplicidad se asume una modulación QPSK (no hay modificación de amplitud entre dos símbolos consecutivos). El salto de fase en la réplica del tercer símbolo (en línea discontinua) se produce dentro del CP (zona sombreada en rojo), por lo que en el periodo de integración útil (zona sombreada en verde), se observan periodos enteros de las sinusoides, con lo que no se produce interferencia intersimbólica. Sin embargo, en el diseño del tamaño del prefijo cíclico debe tenerse en cuenta que supone una reducción de la eficiencia del sistema en un factor $T_b/(T_g+T_b)$, por lo que normalmente se elige una duración que permita absorber un determinado rango de posibles dispersiones del canal, generalmente las de mayor potencia, sin que la pérdida de eficiencia sea elevada.

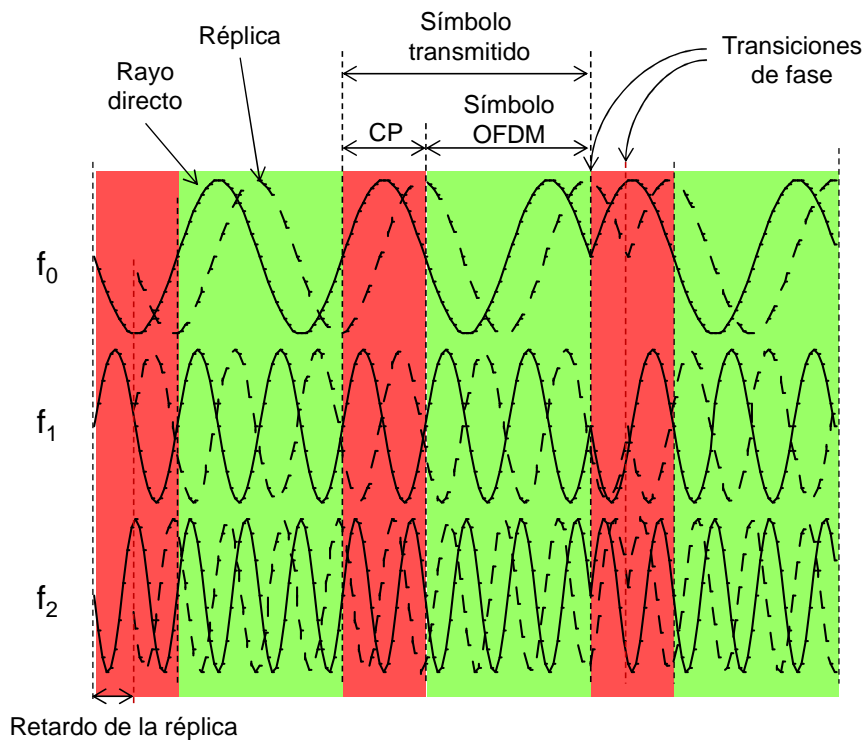


Figura 2.5: Utilidad del prefijo cíclico para absorber las réplicas del canal

Para que la tecnología OFDM sea aplicada en cualquier sistema de comunicaciones móviles es preciso realizar ciertas acotaciones en cuanto a la

estructura frecuencial de la señal OFDM. En primer lugar, para la transmisión de información en el canal radio se hace uso de una determinada frecuencia de portadora (frecuencia central del sistema) con una cierta canalización, establecidas generalmente por la regulación. Por tanto, la subportadora central del ancho de banda no deberá utilizarse para la transmisión de información pues será ocupada por la frecuencia de portadora del sistema. En el equivalente en banda base de la señal OFDM, esta subportadora se denomina *subportadora de DC*. La regulación determina a su vez el nivel máximo de interferencia que el sistema puede crear en el canal adyacente. Dado que el espectro de cada subportadora es teóricamente infinito, es necesario dejar *subportadoras de guarda* a ambos lados del ancho de banda del sistema (N_u en frecuencias altas y N_l en frecuencias bajas) para garantizar el cumplimiento de la restricción de interferencia en canal adyacente.

El resto de subportadoras, que se denominan genéricamente subportadoras activas (N_a) porque son en las que se transmite potencia, se dividen en dos grupos: N_p subportadoras piloto, en las que se transmiten símbolos complejos conocidos por el receptor para las tareas de estimación de canal y medidas de potencia recibida, y N_d subportadoras de datos, en las que realmente se transmite información. Con todo esto, el equivalente en banda base de una señal OFDM puede esquematizarse como se muestra en la Figura 2.6.

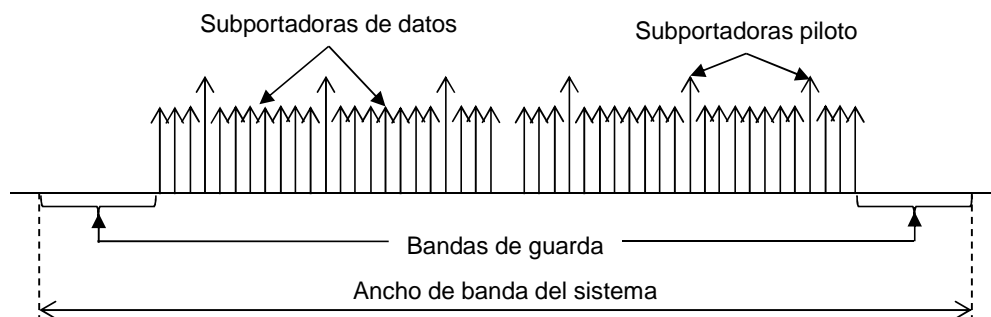


Figura 2.6: Esquema del espectro en banda base de una señal OFDM

En resumen, de las N_C subportadoras en las que se divide el ancho de banda del sistema, solo en $N_d = N_C - N_u - N_l - N_p - 1$ subportadoras se transmite realmente información (que integra el canal de datos y todos los canales de señalización). El número concreto de subportadoras de cada tipo depende del ancho de banda del sistema y es distinto para cada uno de los estándares de comunicaciones móviles revisados. Como muestra, en la Tabla 2.1 se recogen los valores concretos de dichos parámetros para el enlace descendente y un ancho de banda de 5MHz en el estándar WiMAX móvil (configuración PUSC) [IEEE 802.16 Working Group, 2005] y en LTE [TS36.211, 2009]. No se desglosa el número de subportadoras piloto y de datos puesto que depende además de otros muchos factores de configuración del sistema.

Tabla 2.1: Numerología para WiMAX móvil (PUSC) y LTE a 5MHz

	f_s (MHz)	Δf (kHz)	N_C	N_u	N_l	N_a
WiMAX móvil	5.6	10.94	512	45	46	420
LTE	7.68	15	512	105	106	300

2.1.2 Acceso Múltiple OFDMA

Para poder aplicar la tecnología OFDM en una red móvil, es preciso definir un esquema de acceso múltiple en el que se puedan multiplexar los tráfico de distintos usuarios. Este esquema se denomina OFDMA y se basa en la agrupación de subportadoras OFDM en bloques de recursos (RB: *Resource Block*), los cuales se reparten entre los distintos flujos de datos. Debido a la propagación multicamino, un usuario ve diferentes ganancias de canal a lo largo de las subportadoras OFDM. Puesto que cada usuario ve un canal distinto, es muy probable que en las subportadoras donde un usuario observa mal canal, otro observe una buena ganancia. La función de scheduling, ligada a la implementación del procedimiento de control de acceso al medio, deberá

explotar esta diversidad multiusuario y multicanal asignando dinámicamente los RBs entre los flujos existentes y extrayendo así el máximo beneficio del sistema. Un ejemplo gráfico de la diversidad multiusuario puede verse en la Figura 2.7, donde los usuarios 1 y 2 (cuyas condiciones de canal se representan en azul y rojo, respetivamente) reciben idealmente los recursos frecuenciales en los que observa un mejor canal.

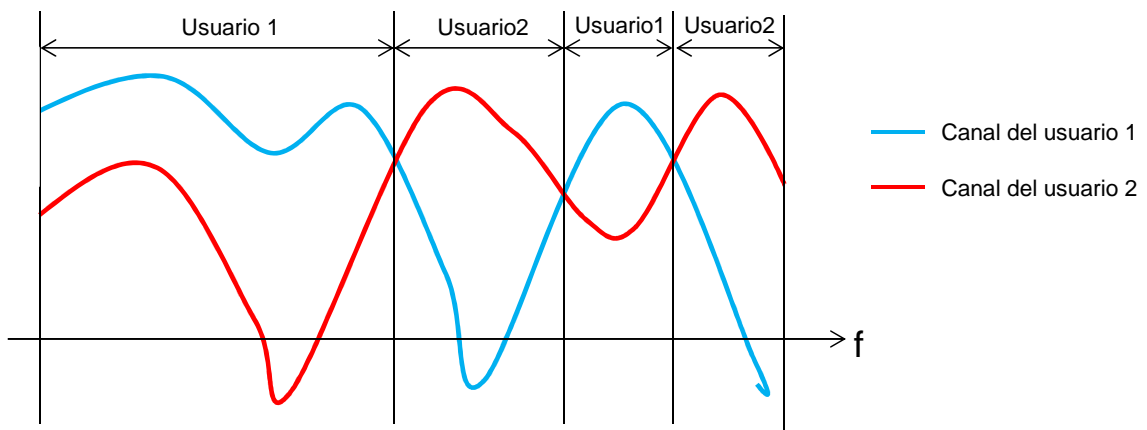


Figura 2.7: Aplicación de la diversidad multiusuario

Generalmente, un RB se define como un total de N_S subportadoras a lo largo de N_T símbolos OFDM consecutivos. O lo que es lo mismo, si se define el recurso básico, al que denominamos RE (*Resource Element*) como una subportadora durante un símbolo OFDM, el RB está constituido por $N_S \times N_T$ REs. El mapeo de las subportadoras que integran un RB puede ser *localizado* o *distribuido*, admitiendo este último varias opciones de implementación (*pseudo-aleatorio* o *uniforme*). Un ejemplo gráfico de estos mapeos se muestra en la Figura 2.8. En el caso de WiMAX móvil, se apuesta preferentemente por un mapeo pseudo-aleatorio, donde las subportadoras que integran un RB se eligen de forma pseudo-aleatoria entre todas las subportadoras del sistema, de modo que ninguna subportadora pertenezca a varios RBs. No obstante, en WiMAX también está contemplado el mapeo localizado, donde las subportadoras que conforman un RB son contiguas en frecuencia. En el caso de LTE se apuesta principalmente tanto por un mapeo

localizado como por un mapeado distribuido uniforme, en el que las subportadoras de un RB se distribuyen uniformemente a lo largo del ancho de banda, manteniéndose durante los N_T símbolos OFDM consecutivos que conforman el RB. Opcionalmente, las subportadoras OFDM asignadas a un RB distribuido cambian símbolo a símbolo.

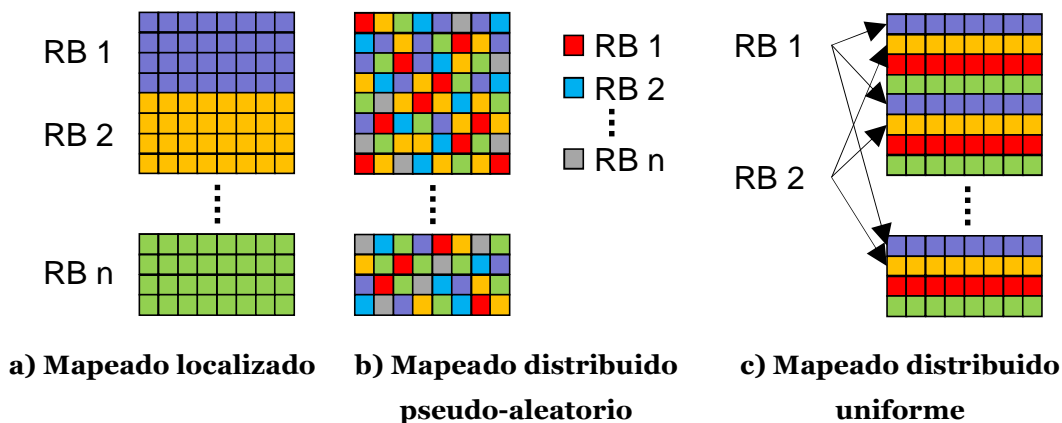


Figura 2.8: Distintos mapeados de subportadoras en RBs

La elección del mapeado de subportadoras está fuertemente condicionada por la capacidad de monitorización del estado del canal, a la vez que tiene fuertes implicaciones en el diseño de los otros aspectos del sistema, como los algoritmos de scheduling. A modo de ejemplo, el mapeado pseudo-aleatorio proporciona de por sí una ganancia en SINR al aleatorizar la ICI cuando distintas secuencias de mapeado se utilizan en celdas contiguas. Por el contrario, este mapeado dificulta la aplicación de técnicas de adaptación del enlace, que sí son posibles en el mapeado localizado. Debido a que estas técnicas de adaptación pueden obtener una importante ganancia al ajustar la transmisión de cada usuario a sus condiciones reales, el mapeado localizado suele ser la opción elegida, siempre que la estimación del canal sea factible. Hay que tener en cuenta que los errores en la estimación de canal pueden hipotecar la ganancia de los esquema de adaptación de enlace, por lo que en su caso la opción preferente sería la distribuida. Así, el mapa tiempo-frecuencia localizado

de una comunicación OFDMA puede esquematizarse como se muestra en la Figura 2.9, donde cada color representa a qué usuario se ha asignado cada RB.

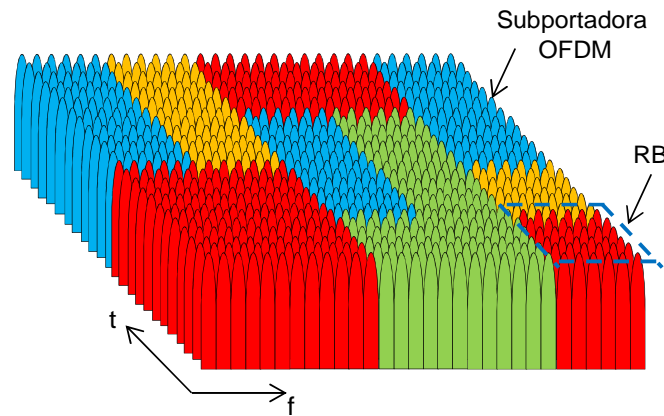


Figura 2.9: Ejemplo del mapa tiempo-frecuencia en una comunicación OFDMA

2.1.2.1 Ventajas de la tecnología OFDMA

La tecnología OFDMA presenta un gran número de ventajas para su implementación en sistemas móviles de alta capacidad, entre las que destacan las siguientes:

- **Robustez frente a la propagación multicamino:** el uso del prefijo cíclico permite eliminar el efecto nocivo de la propagación multicamino siempre y cuando el retardo máximo introducido por el canal sea inferior a la duración de dicho prefijo. En caso de exceder la duración del CP, las réplicas provocan interferencia intersimbólica al perder la ortogonalidad entre subportadoras OFDM, aunque generalmente el impacto no será muy importante porque estas réplicas llegarán altamente atenuadas.
- **Facilidad de implementación:** la ortogonalidad entre subportadoras permite implementar la etapa de modulación y demodulación por medio de la IFFT en el transmisor y la FFT en el receptor. Los procesadores digitales de señal son capaces de realizar eficientemente estas operaciones, con lo que la generación de señal es mucho más simple que en otras tecnologías.

- **Escalabilidad:** el ancho de banda del sistema puede ampliarse o reducirse fácilmente sin más que añadir o eliminar subportadoras OFDM. Esto permite adaptar el sistema a cualquier canalización marcada por la regulación en el espectro radio.
- **Diversidad multiusuario:** dado que la asignación de recursos frecuenciales se puede gestionar dinámicamente a lo largo del tiempo, es posible asignar a cada usuario los recursos frecuenciales en los que mejores condiciones de canal observe. Debido a que cada usuario observa un canal distinto hacia la estación base, es factible encontrar un usuario que tenga buenas condiciones de canal en aquellas subportadoras donde otro observa un desvanecimiento. Lógicamente, este tipo de scheduling frecuencial requiere que los usuarios envíen periódicamente informes sobre el estado del canal (CQIs), lo que reduce la eficiencia del sistema pero que se compensa con creces con la ganancia obtenida al aplicar el scheduling frecuencial.
- **Ecualización frecuencial simple:** la ecualización del canal en la modulación OFDM es muy simple si la comparamos con otros sistemas móviles, como por ejemplo WCDMA (*Wireless Code Division Multiple Access*). Para estimar el canal entre usuario y estación base se utilizan las subportadoras piloto. El receptor conoce la secuencia de símbolos transmitidos en ellas y su potencia de transmisión, con lo que puede estimar la respuesta frecuencial del canal que ha atravesado la señal. Esta respuesta del canal se extrapola al resto de subportadoras y se consigue revertir el efecto del canal sobre ellas. Es posible incluso aplicar secuencias ortogonales a las pilotos de sectores o celdas vecinas, de modo que un usuario pueda estimar también con cierta precisión la potencia recibida de cada una de las celdas vecinas, lo que puede ser muy útil para ayudar en los procesos de handover entre sectores o celdas.

2.1.3 Diferencias entre los estándares de comunicaciones móviles de banda ancha basados en OFDMA

Todas las ventajas descritas anteriormente para la tecnología OFDMA justifican que se haya convertido en la tecnología de acceso seleccionada para los modernos sistemas móviles de banda ancha, principalmente WiMAX móvil y LTE. Ambos sistemas presentan una serie de diferencias que van desde la implementación propiamente dicha de la tecnología OFDMA hasta la arquitectura de red. En el ámbito en el que se centra esta tesis, que es fundamentalmente la asignación de recursos en el interfaz radio, las diferencias fundamentales entre ellos son las siguientes:

- **Implementación de la tecnología OFDMA:** WiMAX utiliza tanto en el enlace descendente como en el ascendente la tecnología OFDMA, mientras que LTE utiliza en el downlink OFDMA y en el uplink una modificación llamada *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA). Básicamente, SC-FDMA es una variante de OFDMA en la que los datos de cada usuario se precodifican por medio de una DFT (*Discrete Fourier Transform*) antes de ser modulados con la IFFT y se impone que las asignaciones a un usuario en una determinada subtrama sean contiguas. Estas modificaciones hacen que la señal transmitida en el uplink tenga un aspecto de espectro continuo que mejora la eficiencia de los amplificadores en los terminales móviles, con lo que es posible prolongar la vida de las baterías.
- **Bandas frecuenciales:** a diferencia de WiMAX móvil, LTE también se define en bandas frecuenciales donde actualmente existen en todo el mundo otros sistemas celulares de comunicaciones móviles como GSM y UMTS, definiendo los procedimientos necesarios para mantener la coexistencia. Por tanto, los operadores que ya tienen estas bandas

apostarán por migrar a LTE, evitando de este modo adquirir nuevas secciones del espectro.

- **Duplexado de la comunicación:** aunque ambos sistemas soportan duplexado frecuencial (FDD: *Frequency Division Duplex*) y temporal (TDD: *Time Division Duplex*), LTE está más orientado a FDD y WiMAX a TDD. Aunque el duplexado temporal proporciona un canal recíproco en el downlink y uplink y permite ajustar a gran escala el reparto de recursos entre ambos enlaces en condiciones no homogéneas de tráfico, lo cierto es que requiere de una sincronización muy precisa y de cierta coordinación entre celdas para evitar la colisión entre tramas downlink de una celda y uplink de otra. Es por esto que el duplexado frecuencial, ya utilizado en los anteriores sistemas móviles como GSM y UMTS, es la opción preferida por los operadores.
- **Arquitectura de la interfaz radio:** ambos sistemas contemplan la posibilidad de concentrar las funciones de gestión de enlace radio en la estaciones base en lo que se ha venido a llamar *arquitectura plana*, si bien en WiMAX esta arquitectura no es la única opción, contemplándose varios perfiles que incluyen también la aplicación de esquemas más centralizados. A diferencia de WiMAX, el acceso radio del sistema LTE se caracteriza por presentar un único elemento: la estación base o *eNodeB*. En los sistemas 2G y versión R99 de 3G, las estaciones base eran meros transmisores y receptores de señal, concentrándose la inteligencia de gestión del interfaz radio en un elemento central, denominado BSC (*Base Station Controller*) en 2G y RNC (*Radio Network Controller*) en 3G. La existencia de este elemento central simplificaba algunos aspectos de los procedimientos del interfaz radio, como por ejemplo los handovers, pero implicaba un alto grado de latencia en otros procesos tales como el scheduling radio, puesto que las decisiones sobre la asignación de

recursos se realizaban en la BSC o RNC. A partir de la R5 de UMTS, las estaciones base comienzan a asumir algunas de las funciones de gestión del enlace radio, con el fin de reducir la latencia de estos procedimientos. En el caso de LTE, este nuevo planteamiento se ha llevado al extremo y no existe ningún elemento entre eNodeB y core (denominada *Evolved Packet Core* en LTE). Los eNodeB concentran toda la inteligencia para la gestión del interfaz radio, tomando por ejemplo las decisiones de scheduling de forma autónoma sin tener que comunicarse con otros elementos de la red. Esto permite, entre otras cosas, el scheduling rápido de paquetes, siguiendo con mayor precisión la evolución del canal radio hacia cada usuario y proporcionando una gestión más ajustada de la QoS. El estándar LTE considera además un interfaz entre estaciones base, denominado interfaz X2, que permite que los eNodeB intercambien señalización para la coordinación de interferencias o balanceo de carga, lo que permite obtener un uso más eficiente del interfaz radio.

- **Entramado de la comunicación:** WiMAX contempla la configuración de distintas duraciones de trama (de 2,5 a 20ms) si bien utiliza principalmente tramas de 5ms de duración, lo que significa que la celda solo es capaz de realizar asignaciones de recursos cada 5ms. Sin embargo, las asignaciones de recursos en LTE se actualizan con una periodicidad de 1ms, lo que permite una gestión más dinámica de los tráfico, reduciendo considerablemente la latencia en las transmisiones y permitiendo un uso de la información de canal más precisa. En concreto, en LTE la interfaz radio presenta una estructura jerárquica, como se muestra en la Figura 2.10, estructurada en primer lugar en tramas de 10ms. Algunos procedimientos, como el envío de señalización común de la celda o ráfagas de señalización, presentan una periodicidad a nivel de trama. A su vez, cada trama se divide en 10 subtramas de 1ms cada una, siendo la subtrama la unidad temporal de scheduling en LTE, es decir, la

subtrama se corresponde con el TTI (*Transmission Time Interval*). Cada milisegundo, el eNodeB realiza una nueva asignación de recursos del downlink y del uplink para la subtrama siguiente. Otros procedimientos, como los procesos de HARQ o el reporte de CQIs, se realizan cada pocas subtramas, lo que da una idea del dinamismo y precisión que es posible obtener en la gestión de recursos en el sistema LTE.

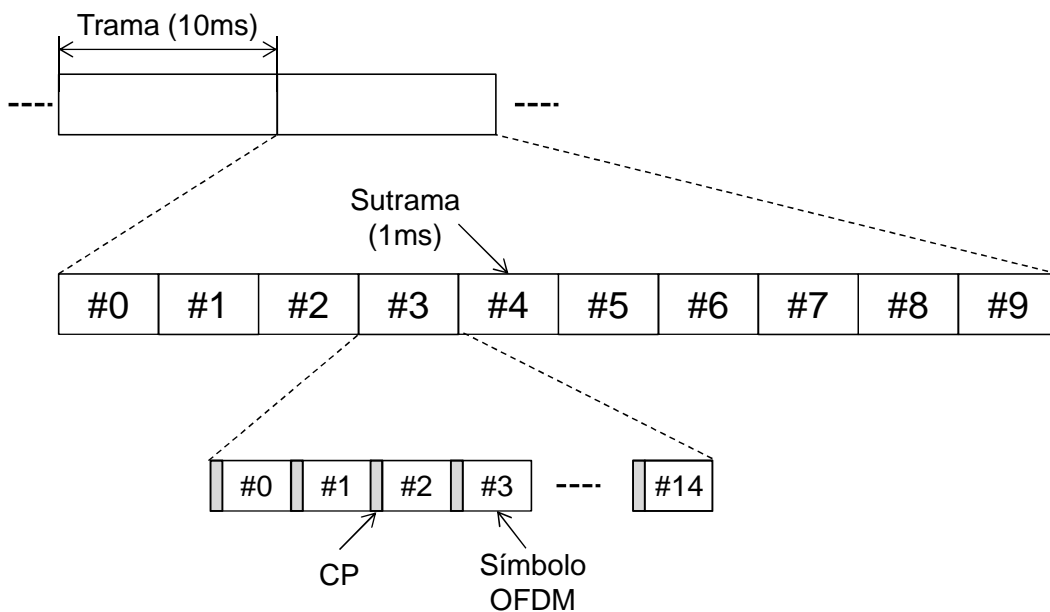


Figura 2.10: Estructura de trama en LTE

- **Tasas de datos:** la capacidad de ambos sistemas en condiciones similares es parecida. Sin embargo, el estándar LTE define un mayor número de posibles configuraciones multiantena (MIMO: *Multiple Input Multiple Output*), que pueden llevar la tasa a valores muy por encima de WiMAX móvil (300Mbps de bajada y 75Mbps de subida con MIMO 4x4 [Holma y Toskala, 2009]).
- **Asignaciones de recursos frecuenciales:** en LTE, la unidad mínima de asignación del sistema es el RB, que se compone de un número elevado de subportadoras (normalmente 120 subportadoras). El tamaño de dichos RBs y su correspondencia con las subportadoras OFDM son

fijos y definidos a priori. En WiMAX móvil, sin embargo, la unidad mínima de asignación es mucho menor (típicamente de 24 subportadoras), agrupándose de una forma mucho más dinámica que en LTE. Este esquema permite asignaciones más ajustadas a las necesidades reales del usuario pero incrementa la señalización necesaria para indicar las asignaciones. Al mismo tiempo, si se aplica un mapeado pseudo-aleatorio de subportadoras, se limita el uso de mecanismos de scheduling frecuencial basados en medidas de calidad de canal de los usuarios, pues las agrupaciones de recursos cambian de una subtrama a otra y la interferencia provendrá de diversos usuarios, con lo que presentará un patrón más aleatorio e impredecible en base a los CQIs reportados por los usuarios. Los CQIs deberán entonces ser generales para toda la banda más que agrupadas por RBs como en el caso de LTE, con lo que se pierde precisión en el scheduling frecuencial.

Todas a estas características justifican por qué LTE es el estándar que se está imponiendo en todo el mundo para las comunicaciones móviles celulares de banda ancha. Es por esto que en esta tesis se han tomado como referencia los parámetros de dicho sistema para realizar las distintas evaluaciones de los algoritmos de asignación de recursos radio propuestos.

2.2 Mecanismos de control de la ICI para el enlace descendente

El espectro radio es un recurso muy escaso, por lo que para obtener un mayor aprovechamiento del mismo se plantea la reutilización de frecuencias a lo largo de la red. Esto supone lógicamente la aparición de interferencias intercelulares cuando un mismo canal es utilizado en celdas próximas. En los sistemas móviles de banda ancha actuales, como WiMAX o LTE, se propone el despliegue de una red monoportadora con reuso unidad, es decir, todas las

celdas de la red utilizan simultáneamente el mismo ancho de banda. Naturalmente, este despliegue provoca fuertes interferencias entre celdas y especialmente a aquellos usuarios situados cerca del límite de la misma, llegando a valores de SINR por debajo de 0dB y haciendo imposible la demodulación de los datos recibidos. De forma análoga, para aquellos sistemas en los que los recursos puedan ser reutilizados dentro de la celda una vez por sector, los usuarios situados en la frontera entre sectores sufrirán además fuertes interferencias debidas a las señales transmitidas por los otros sectores de su propia celda. Todo esto justifica la necesidad de aplicar mecanismos de control de la interferencia que mitiguen su efecto y permitan establecer comunicaciones fiables en los límites de las celdas.

La ICI en redes OFDMA tiene una naturaleza altamente variable e impredecible. Las fuentes que contribuyen a generar interferencia son pocas, siendo típicamente las 2-3 celdas interferentes más próximas las que provocan el grueso de la interferencia recibida [Plass, 2006]. Las condiciones particulares de estas celdas serán las que en buena medida determinen la interferencia sufrida por los usuarios. Si las celdas están poco cargadas será probable que se produzcan cambios en la ocupación de RBs, es decir, que de una subtrama a otra cambien los RBs en los que se transmite potencia, lo que puede verse como un efecto ON-OFF en la potencia transmitida y contribuye a aumentar la variabilidad de la interferencia. 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 [Stüber, 2001]. 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 BLER en la recepción de los bloques de datos. 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.

Los mecanismos de control de interferencia pueden clasificarse en tres grandes grupos: mitigación de interferencias, cancelación de interferencias y coordinación de interferencias. Cada una de estas opciones, que serán detalladas en los apartados siguientes, 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.

2.2.1 Mitigación de interferencias

La mitigación de interferencias aplica distintas técnicas para aleatorizar la señal interferente de modo que presente poca correlación con la señal útil. En los siguientes subapartados se describen tres técnicas importantes para la mitigación de interferencias que pueden encontrarse en la literatura. En todos los casos, la ganancia obtenida con la mitigación de interferencias es reducida incluso en los mejores casos, por lo que deberá utilizarse siempre junto con otro mecanismo de control de interferencias para asegurar unas condiciones de canal suficientemente buenas a los usuarios del límite de la celda, como se sugiere para el caso de WiMAX móvil en [Edt, 2006].

2.2.1.1 Scrambling

El scrambling se basa en aplicar secuencias pseudo-aleatorias distintas entre celdas contiguas de modo que gracias a las propiedades de correlación de dichas secuencias, la interferencia en cada subportadora quede distribuida a lo largo de todo el espectro. Las secuencias de scrambling se pueden aplicar sobre el símbolo OFDM en tiempo [Wang y Lilleberg, 2006], sobre los símbolos complejos a transmitir [R1-050589, 2005] o como es el caso de LTE, sobre los propios bits de datos a modular e independientemente para cada flujo de datos [TS36.211, 2009]. En el primer caso, al multiplicar la secuencia de scrambling por la señal en tiempo, se pierde la ortogonalidad entre subportadoras, produciéndose un trasvase de energía de subportadoras de datos a subportadoras piloto y viceversa. Cuando el scrambling se aplica en frecuencia, es decir, sobre los símbolos complejos a modular, se puede limitar exclusivamente al canal de datos, evitando el efecto negativo sobre las subportadoras piloto. Sin embargo, el efecto en el canal de datos es similar al anterior, observándose en cada subportadora contribuciones de potencia de un gran número de subportadoras interferentes, dependiendo de la longitud de la secuencia de scrambling. En [R1-050589, 2005] en concreto, se proponen secuencias de scrambling que se extienden a lo largo de todo el ancho de banda. La interferencia se verá pues como una combinación pseudo-aleatoria de diversas contribuciones que además variarán de un símbolo a otro. Esto limitará enormemente la aplicabilidad posterior de técnicas de adaptación del enlace, que permiten ajustar la transmisión, principalmente la potencia y la MCS en base a las condiciones de canal del usuario. Por el contrario, el uso de scrambling en los bits de datos permite mantener la coherencia de la estructura de RBs, con lo que se pueden seguir aplicando la adaptación del enlace y por eso ha sido la opción elegida para el estándar LTE.

2.2.1.2 Frequency Hopping

En el caso de frequency hopping, la aleatorización de la ICI se logra aplicando distintos patrones de salto pseudo-aleatorios a la hora de mapear el conjunto de REs que componen un RB en las subportadoras del sistema OFDMA (el mapeado en este caso, obviamente es distribuido). Al aplicar distintos patrones de salto en celdas contiguas (Figura 2.11), la interferencia observada en cada subportadora del RB proviene en realidad de RBs distintos en las celdas interferentes, con lo que se reduce la correlación entre señal útil e interferente. Además, en condiciones de baja carga y sin necesidad de que exista coordinación entre celdas, la interferencia promedio experimentada en el RB se reduce puesto que en algunos REs es factible que no se reciba potencia de una o más celdas interferentes, ya que no todos los RBs son utilizados en todas las celdas.

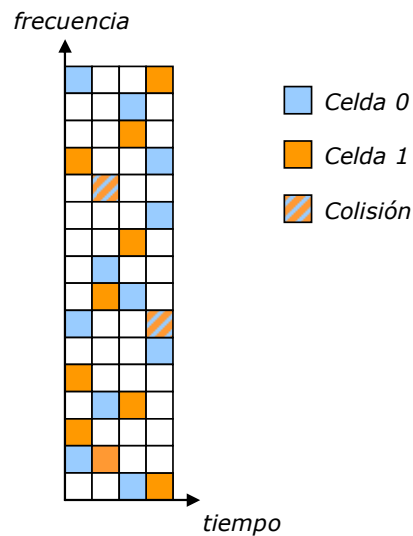


Figura 2.11: Ejemplo de Frequency Hopping

Como sucede en el caso del scrambling, debido a que la interferencia observada en el RB se compone de muchas contribuciones pseudo-aleatorias, no es posible obtener una estimación precisa del canal y por tanto la utilización de técnicas de adaptación del enlace no resulta tan beneficiosa. En [R1-051042, 2005] por ejemplo se compara el throughput que puede conseguirse haciendo

uso de frequency hopping frente a un ejemplo de mapeado localizado como el empleado en LTE. Las prestaciones del frequency hopping solo son mejores para velocidades altas, puesto que en ese caso, la alta variabilidad del canal impide obtener una estimación precisa de las condiciones del usuario, con lo que la ganancia debida a la adaptación del enlace se diluye. A velocidades bajas se puede seguir con la suficiente precisión la evolución del canal y la adaptación del enlace logra obtener ganancias en throughput próximas al 50%.

2.2.1.3 2D-Phase Offset Diversity (2D-POD)

La técnica de mitigación 2D-POD [Ramamurthi, 2009] se basa en el conformado de haz para reducir la interferencia proveniente de otras celdas. En sistemas multiantena, la solución elegida normalmente para el conformado de haz pasa por transmitir la misma señal por cada antena pero aplicando una rotación de fase determinada. Dicho valor se elige de forma que la potencia de la señal útil a la salida del combinador de señales en el receptor sea máxima dependiendo de la fase de cada uno de los canales entre las antenas transmisoras y receptoras. La propuesta de 2D-POD sin embargo es aplicar una rotación de fase tal que se reduzca la potencia interferente a la salida del combinador, a costa de cierta pérdida de ganancia de array en la señal útil. Se busca por tanto una combinación en fase de la señal útil y en contra-fase de las señales interferentes provenientes de cada BS. Para ello, la celda debe conocer la rotación de fase que cada celda vecina aplica en sus transmisiones así como la potencia recibida por el usuario de cada una de ellas con el fin de decidir qué interferencia es más conveniente mitigar en un RB determinado. Por tanto, sólo la última celda en realizar la asignación es capaz de obtener ganancia por mitigación basándose en las asignaciones realizadas por las otras BSs, que además deberán mantenerse a lo largo del tiempo para que se consiga la combinación en contra-fase. Todas estas restricciones, unidas a que con esta técnica se requiere un intercambio importante de señalización entre elementos

por la red cableada (*backhaul*), hacen que no sea aconsejable su aplicación en las redes móviles actuales.

2.2.2 Cancelación de interferencias

La cancelación de interferencias pretende, por medio de un fuerte procesado de señal, suprimir la potencia interferente, al menos la interferencia dominante, más allá de lo que se logra con las técnicas de diversidad. La técnica de cancelación de interferencias que más interés ha concentrado en los últimos tiempos es el acceso múltiple por división en entrelazado (IDMA: *Interleave Division Multiple Access*) [Ping y otros, 2003]. Con esta técnica se pueden separar por medio de demodulaciones recursivas la señal proveniente de diferentes fuentes interferentes cuando se aplican distintos patrones de entrelazado de los datos. El procedimiento es el siguiente: cada bit de información transmitido se ensancha mediante un código conocido y común a todas las celdas, aplicándose posteriormente la secuencia de entrelazado propia de la celda. El proceso de demodulación se muestra en la Figura 2.12: el receptor demodulará la señal recibida (S_i) con el patrón de entrelazado de su celda útil (bloque I_u^{-1}), obteniendo así una primera estimación de los datos transmitidos Z_u . Estos bits recibidos vuelven a modularse (I_u) y se restan de la señal inicialmente recibida para obtener una estimación de la señal interferente S_i . Sobre esta señal se aplica nuevamente el proceso de demodulación pero en esta ocasión con el patrón de entrelazado de la celda más interferente (I_i^{-1}), con lo que se obtiene una estimación de la secuencia de bits transmitida por dicha celda. Esta secuencia vuelve a modularse (I_i), obteniéndose una estimación de la interferencia Z_i que se resta de la señal inicialmente recibida, con lo que se obtiene una mejor estimación de la señal realmente transmitida por la celda útil (S_r). Este proceso puede repetirse tantas veces como se desee para obtener una estimación más precisa de la señal transmitida.

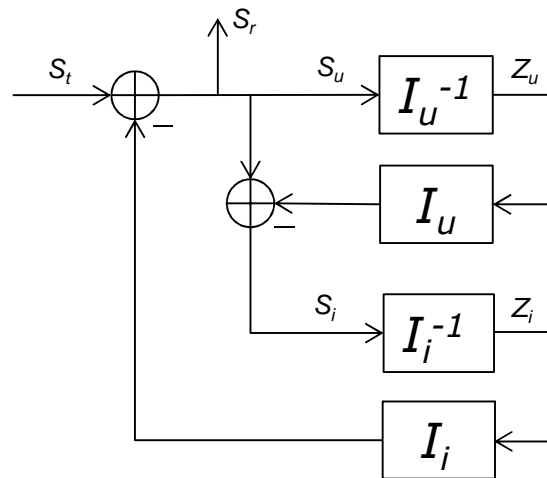


Figura 2.12: Esquema del demodulador IDMA

El sistema IDMA presenta dos problemas fundamentales: por un lado, el proceso de demodulación es extremadamente complejo y supone un gasto computacional muy elevado a medida que el número de iteraciones crece o son más las señales interferentes que se desea cancelar. Es por esto que suele hablarse exclusivamente de cancelar la interferencia dominante. Por otra parte, la técnica IDMA impone fuertes restricciones a la red en cuanto al sincronismo entre BSs, ya que el UE debe recibir con una desviación temporal muy pequeña la señal proveniente de las celdas más próximas. Además, la asignación de RBs debe tener cierta coherencia entre celdas, es decir, que todas las celdas asignen a los UEs los mismos grupos de RBs, de modo que la transmisión correspondiente a cada entrelazador se reciba solapada y alineada [R1-060415, 2006]. Todas estas imposiciones hacen difícil la aplicación de esta técnica en las nuevas redes móviles de banda ancha.

2.2.3 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, y especialmente por 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 usuarios situados en el exterior de la misma. Por tanto, en el diseño de algoritmos de asignación de recursos realmente eficientes deberán tomarse en consideración las restricciones impuestas por el mecanismo de coordinación para de este modo reducir su impacto sobre el throughput global. Las restricciones impuestas por la coordinación de interferencias no son generalmente tan limitantes como las de la cancelación de interferencias y son más fáciles de integrar en el algoritmo de asignación de recursos. Además, a diferencia de los esquemas de mitigación, la coordinación de interferencias no supone una limitación significativa para la aplicación de técnicas de adaptación del enlace, por lo que ha sido considerada como el mecanismo fundamental para el control de las interferencias en las modernas redes móviles de banda ancha.

De forma general, las restricciones impuestas por los mecanismos de coordinación de interferencias afectan a los recursos radio que pueden ser asignados a los usuarios exteriores, es decir, los que presentan peores condiciones de canal y por tanto necesitan un tratamiento específico para poder recibir servicio. La clasificación de los usuarios entre interiores y exteriores puede realizarse atendiendo a la posición geográfica del usuario (se consideran exteriores aquellos usuarios cuya distancia a su BS supere un cierto umbral [Shariat y otros, 2006]), la señal promedio recibida [Elayoubi y otros, 2008] o a la SINR promedio recibida (son exteriores aquellos usuarios que reciban la señal con una SINR inferior a un umbral dado [Necker, 2007a]). La clasificación basada en SINR es capaz de caracterizar con mayor precisión las condiciones reales en las que se encuentra el usuario y por tanto es la opción que ofrece unas mejores prestaciones [Lei y otros, 2007].

Las propuestas que pueden encontrarse en la literatura en lo que se refiere a la coordinación de la ICI contemplan tanto soluciones estáticas como dinámicas con distintos grados de adaptación de las restricciones aplicadas en el acceso a los recursos. En los mecanismos estáticos, la configuración del esquema de coordinación se mantiene inalterada durante largos periodos de tiempo. Esta opción, que facilita el despliegue de la red, no permite adaptarse a cambios más o menos puntuales en la distribución geográfica de la demanda. Es por esto que se proponen también esquemas que ajustan dinámicamente las restricciones impuestas por la coordinación con el fin de dar respuesta a estos cambios en la distribución de la demanda. En [Rahman y Yanikomeroglu, 2010], por ejemplo, las decisiones de modificación del esquema de coordinación son llevadas a cabo por un elemento central de la red, que concentra la inteligencia a este respecto. Este nodo debe recopilar información de carga de todas las celdas bajo su dominio para de este modo realizar el ajuste más provechoso para la red. Por tanto, existirá una cierta latencia entre la generación de las medidas de carga por parte de las celdas y la recepción de la correspondiente respuesta del elemento central. Con el fin de reducir dicha latencia, existen también esquemas distribuidos en los que son las propias celdas las que negocian entre sí el ajuste de los parámetros de la coordinación, más acorde con la arquitectura plana que define LTE. En estos casos, el intercambio de información entre BSs a través del backhaul es muy alto y hay que prestar especial atención a que las decisiones tomadas por una celda en beneficio propio no supongan un perjuicio para otras celdas de las proximidades, lo que complica enormemente el diseño de los algoritmos de adaptación eficientes. Existe por tanto un compromiso entre la complejidad de los algoritmos de adaptación de la coordinación y la carga de señalización requerida a través del backhaul.

Otro aspecto importante en lo que se refiere a los mecanismos de coordinación adaptativos es la periodicidad con la que se permite realizar una adaptación de los parámetros del esquema coordinación. Una periodicidad alta

supone un intercambio elevado de señalización entre las entidades y un gran número de ajustes a lo largo del tiempo. Por el contrario, una periodicidad baja implica menos señalización por backhaul pero es más difícil adaptarse a los picos de demanda. En [Necker, 2007b] se muestra que a partir de un cierto valor crítico de periodicidad, ya no es posible seguir con la suficiente precisión los cambios sufridos en la demanda o en el canal y las prestaciones globales comienzan a ser insensibles a la periodicidad aplicada. Es deseable por consiguiente encontrar el compromiso entre señalización y capacidad de seguir los picos de demanda para definir el valor concreto de la periodicidad.

Dependiendo del recurso coordinado, existen tres tipos fundamentales de esquemas de coordinación: coordinación en potencia, en frecuencia y en tiempo. La coordinación en potencia fija diferentes niveles de potencia transmitida en determinados recursos para poder alcanzar a los usuarios situados en el exterior de la celda y ofrecer diferentes condiciones de ICI a las celdas vecinas. Por su parte, en la coordinación en frecuencia se establecen restricciones en cuanto a los recursos frecuenciales que pueden ser asignados a los usuarios dependiendo de su ubicación geográfica o de sus condiciones de canal. La coordinación en tiempo fija determinados instantes temporales en los que no se permite transmitir a los usuarios considerados como exteriores. Tomando como referencia el sistema LTE, en [Giuliano y otros, 2008a], por ejemplo, se propone que los usuarios interiores y exteriores transmitan en subtramas distintas. Sin embargo, al no definir ningún mecanismo de coordinación entre celdas contiguas para evitar colisiones entre ellas, las simulaciones presentadas indican que en la zona exterior es necesario un reuso frecuencial alto para reducir la ICI, lo que disminuye su eficiencia. Un esquema más agresivo se presenta en [R1-070284, 2007], donde los usuarios exteriores de celdas contiguas transmiten en símbolos OFDM distintos de la misma subtrama para evitar las interferencias con los usuarios interiores de otras celdas. Esto dificulta la definición de estructuras de RBs para gestionar los recursos de forma que

requieran poca señalización y no compliquen enormemente la tarea de scheduling. Aunque el comportamiento de la coordinación en tiempo y la coordinación en frecuencia puede parecer análogo, lo cierto es que la coordinación en tiempo requiere una sincronización entre celdas mucho más precisa, al tiempo que se limitan las libertades del scheduler al prohibir la asignación de los usuarios exteriores en determinados instantes temporales. Estas consideraciones justifican que en la inmensa mayoría de las propuestas, se trabaje únicamente con coordinación en frecuencia y potencia, obteniéndose unas mejores prestaciones cuando se definen esquemas que combinan ambos tipos de coordinación.

2.2.3.1 Soluciones clásicas para la coordinación de interferencias

Las soluciones típicamente utilizadas para la coordinación de interferencias en las primeras redes móviles son el reuso frecuencial y la sectorización [MacDonald, 1992]. En el reuso frecuencial, el ancho de banda del sistema es dividido en un total de N_{sb} subbandas ortogonales. Celdas vecinas utilizan subbandas distintas de modo que la ICI proviene de celdas lejanas. Cuanto mayor es el factor de reuso, es decir, el número de subbandas ortogonales, mejor es la SINR observada en recepción, y por tanto el throughput alcanzable, ya que las celdas interferentes están más alejadas [Fu y Sheen, 2007]. Como contrapartida, un factor de reuso alto significa que la subbanda frecuencial asignada a cada celda es más pequeña, lo que aumenta el bloqueo en la celda y reduce el número de usuarios que pueden ser servidos. Existe por tanto un compromiso a la hora de fijar el factor de reuso entre la SINR ofrecida y la capacidad de la celda en número de usuarios soportables.

Con el despliegue de las redes celulares de segunda generación y el aumento en el número de usuarios, se hacía necesaria una utilización más eficiente del espectro radio disponible. Surgió entonces el concepto de *sectorización celular*: el área de cobertura de la celda se divide en un número N_s de sectores

(típicamente 3), cada uno de los cuales utiliza una subbanda frecuencial distinta y es servido por un transmisor independiente. El uso de antenas tipo panel con baja radiación hacia atrás hace que el grueso de la interferencia provenga de los sectores interferentes cuyas antenas apuntan al sector en cuestión, como se muestra en la Figura 2.13 para el caso de $N_{sb}=7$ comúnmente utilizado en sistemas 2G [Chan, 1992]. Las celdas con sombreado utilizan la misma subbanda frecuencial, pero solo las rayadas interfieren realmente a la celda central.

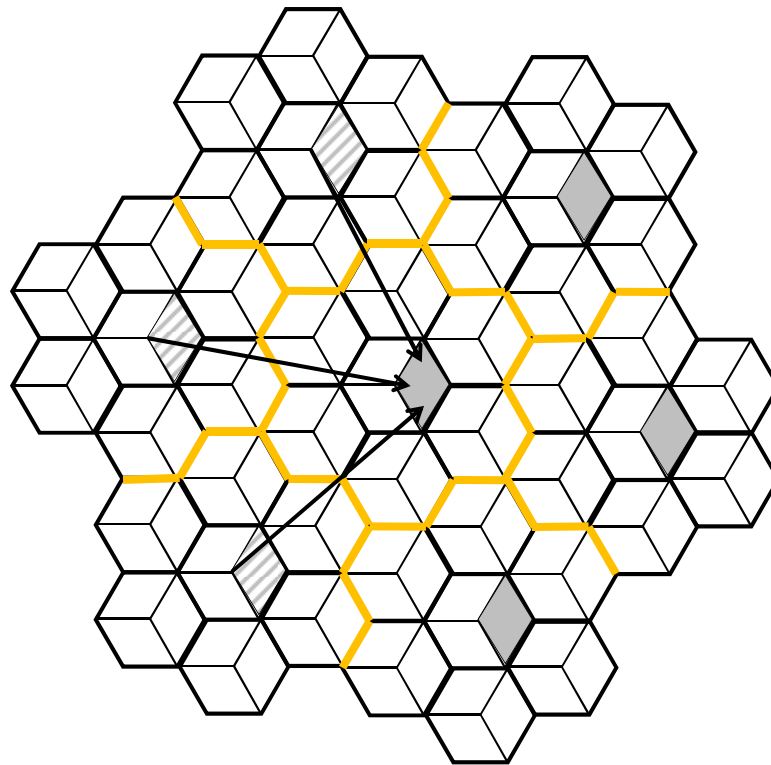


Figura 2.13: Despliegue con tri-sectorización y reuso $N_{sb}=7$

Otro ejemplo de esquema sectorizado con reuso se propone en [Boustani y otros, 2009], donde el ancho de banda del sistema se divide en 16 subbandas, agrupadas de 4 en 4 y asignando cada una de estos grupos de forma disjunta a celdas contiguas, con lo que no hay ICI con las celdas más próximas. Cada celda se compone de 8 sectores, que por parejas asignan las 4 subbandas que corresponden a la celda (diferentes colores y rellenos en la Figura 2.14). La

evaluación presentada en dicho trabajo muestra una mejora en la SINR debido a que cada sector solo interfiere a una de las celdas de las proximidades. Sin embargo, las simulaciones realizadas asumen antenas ideales muy directivas que solo radian en los ángulos de su sector. Además, no se analiza el impacto que dicho esquema tiene sobre la accesibilidad de los recursos, puesto que sólo 1/16 de la banda es accesible en cada sector, lo que llevará con frecuencia a situaciones de bloqueo ante cargas no homogéneas. Debido a las complicaciones tecnológicas, al más que probable bloqueo de usuarios y al coste de implementación asociado a sectorizaciones tan elevadas, el esquema típico de sectorización que suele considerarse en la literatura se basa en $N_S=3$ sectores, que será el esquema de sectorización que consideraremos a lo largo de esta tesis.

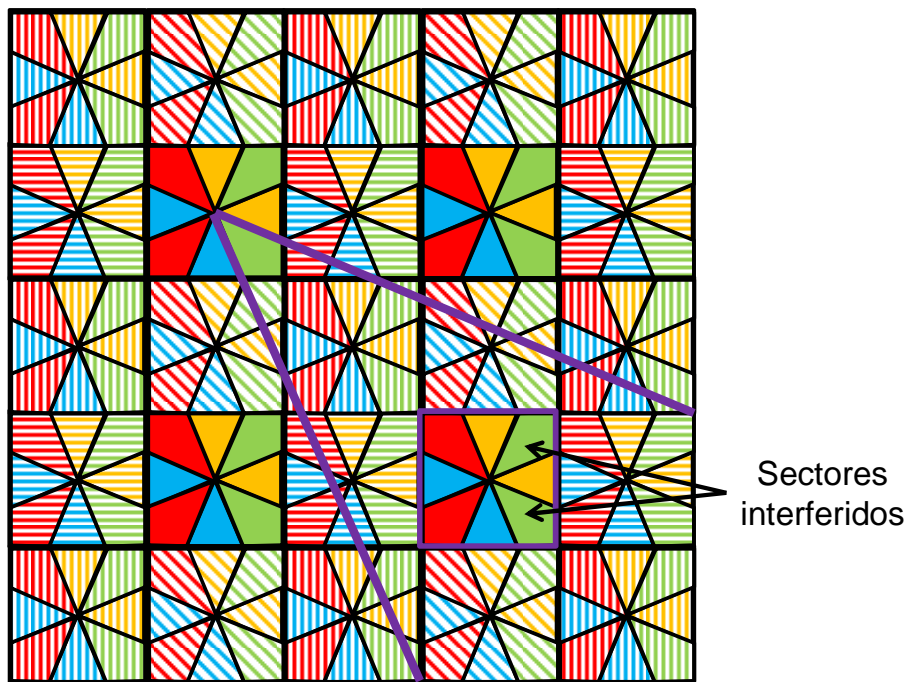


Figura 2.14: Sectorización con 8 sectores asignando por parejas

El reúso frecuencial con sectorización, que ofrecía buenas prestaciones para los requerimientos de calidad de señal y tráfico propios de las redes 2G, comienza a no ser suficiente a medida que la demanda de servicios y tráfico por parte de los usuarios aumenta. Para obtener un mayor aprovechamiento del

ancho de banda disponible, se necesitan factores de reuso más agresivos que permitan gestionar de una forma más versátil los recursos radio disponibles, al tiempo que se garantiza una calidad de señal suficiente en los usuarios del límite de la celda. El escenario límite, y que es el propuesto para las nuevas redes móviles de alta capacidad, se basa en una red monoportadora de reuso unidad, de modo que el ancho de banda del sistema es compartido por todas las celdas del despliegue. En este caso, el uso de sectorización permite mejorar también las condiciones de interferencia frente al reuso unidad puro puesto que reduce el número de sectores interferentes también para redes OFDMA [Kelif y otros, 2008; Riedel y otros, 2010]. Sin embargo, en este escenario la sectorización clásica no ofrece la suficiente protección a los usuarios exteriores como para garantizar unas condiciones de canal suficientemente buenas, lo que dificulta que el sistema sea capaz de ofrecer las prestaciones necesarias para satisfacer la creciente demanda de tráfico. Son necesarias técnicas de coordinación de interferencias más robustas para garantizar una calidad suficiente de señal en los límites de la celda. Es aquí cuando surgen las técnicas mixtas de coordinación en frecuencia y potencia, que suponen la inmensa mayoría de las propuestas que pueden encontrarse en la literatura para las redes OFDMA de banda ancha y que serán detalladas en el siguiente subapartado.

Tanto el reuso frecuencial puro como la sectorización presentan un problema de bloqueo ante distribuciones heterogéneas de carga: en el caso de reuso frecuencial, el reparto estático de las subbandas frecuenciales provoca bloqueo de usuarios en las celdas cargadas e infrautilización de recursos en las celdas poco cargadas. Y lo mismo sucede en el caso de la sectorización, pero en este caso el problema surge con distribuciones heterogéneas entre los sectores de una misma celda. Este inconveniente puede mitigarse si se hace uso de esquemas de reuso flexible, asumiendo que la flexibilización del reparto frecuencial supone un incremento de la ICI. En [R1-050833, 2005], la banda frecuencial se divide en tres subbandas para coordinar clusters de tres celdas

colindantes. A cada una de estas subbandas se les asigna un índice de prioridad distinto en cada subbanda como se muestra en la Figura 2.15a. Cuando la carga de las celdas es inferior a $1/3$ de los recursos disponibles, la asignación entre celdas es ortogonal, a modo de reuso frecuencial clásico. Para condiciones superiores de carga, cada celda comienza a asignar recursos de la siguiente subbanda por orden de prioridad, con lo que las asignaciones entre celdas dejan de ser ortogonales y surgen interferencias entre celdas colindantes. Un algoritmo similar fue propuesto en [Engel y Peritsky, 1973] para redes con reuso frecuencial mayor que uno con el fin de reducir la probabilidad de sufrir interferencias entre dos celdas que utilizan la misma subbanda frecuencial. De forma similar, en [Kim y Oh, 2007] se propone un reuso flexible basado en la ocupación ordenada de RBs de las subbandas de otras celdas (Figura 2.15b). En ninguno de estos casos se explica claramente el criterio de asignación de los RBs ocupados a otras celdas, por lo que estos podrían ser asignados a usuarios potencialmente muy interferentes para las celdas que sufren la ocupación. Un diseño más inteligente pasaría, por ejemplo, por asignar dichos RBs a los usuarios que menor potencia de transmisión van a requerir con el fin de minimizar la ICI generada a la otra celda. Estos mismos conceptos podrían aplicarse también de forma directa para generar una sectorización flexible que se adapte a condiciones heterogéneas de carga entre sectores, como bien se apunta en [Kim y Oh, 2007].

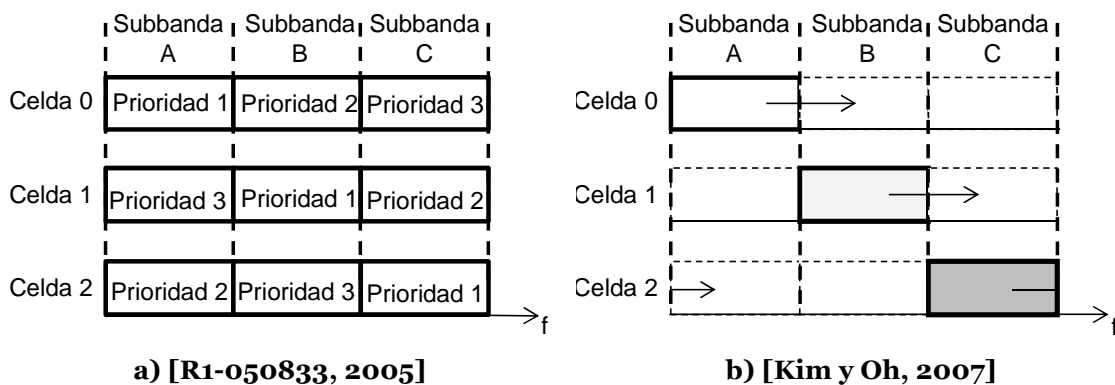


Figura 2.15: Esquemas de sectorización flexible

2.2.3.2 Soluciones de coordinación en las nuevas redes de banda ancha

Como ya se ha comentado, la mayor parte de las soluciones de coordinación de ICI (ICIC: Inter-Cell Interference Coordination) en redes móviles de banda ancha se basa en una coordinación mixta en frecuencia y potencia para obtener unas mejores prestaciones. El principio fundamental de estas soluciones pasa por definir subbandas frecuenciales dentro del ancho de banda de la celda con diferentes restricciones a la asignación de recursos y aplicar varios niveles de potencia en ellas de forma coordinada a lo largo de la red. En redes de reuso frecuencial unidad, las restricciones impuestas por la coordinación van orientadas a mejorar las condiciones de canal experimentadas por los usuarios situados en el límite entre celdas (o en los límites entre sectores para reuso unidad a nivel de sector), al tiempo que se proporciona una accesibilidad suficiente a los usuarios interiores como para que estas restricciones no limiten el throughput global de la celda.

Las soluciones de ICIC se basan en dos esquemas típicos de coordinación frecuencial: la sectorización y el reuso fraccional. Tomando como referencia esos esquemas, en la literatura se pueden encontrar múltiples variantes que incorporar diferentes grados de flexibilidad o protección en el acceso.

Sobre un esquema sectorizado clásico es posible aplicar restricciones en cuanto a la potencia transmitida en determinados recursos para crear así una coordinación en potencia. A modo de ejemplo, en [R1-050833, 2005] se propone agrupar a los usuarios de cada sector atendiendo a su potencia requerida, y cada uno de estos grupos se asigna en un subconjunto específico de RBs de la subbanda del sector (Figura 2.16). El objetivo de este esquema es que cada RB se asigne siempre a usuarios con similares condiciones, con lo que la interferencia será más estable. Tal y como se aprecia en la Figura 2.16, las máscaras de potencia se repiten a nivel de sector.

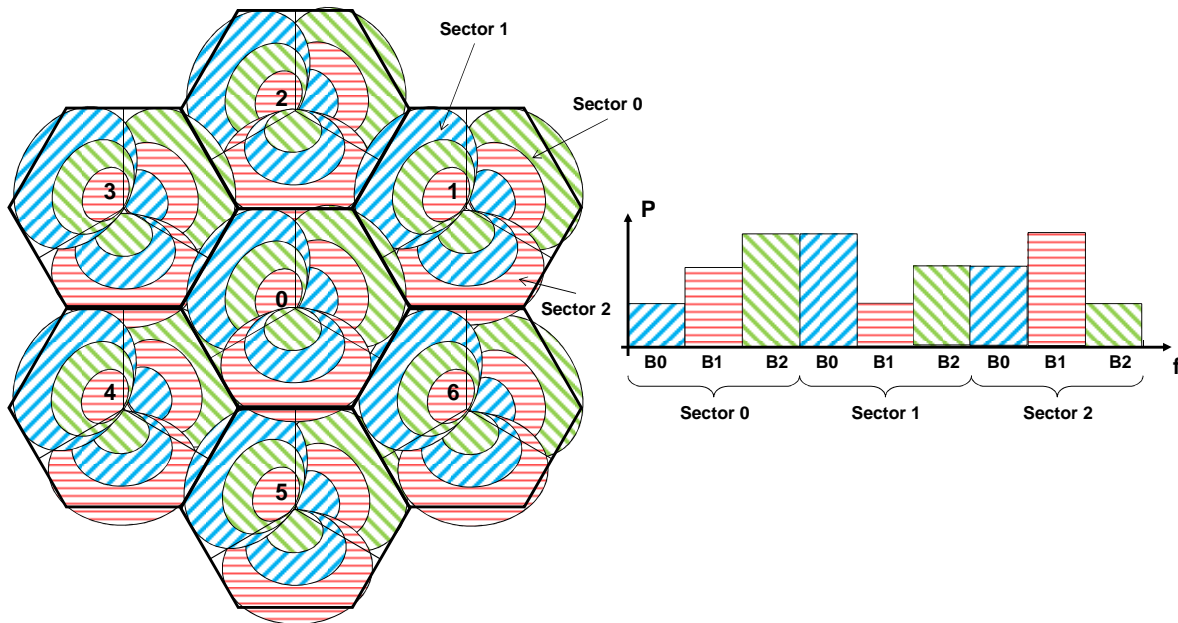


Figura 2.16: Asignación de RBs por potencia requerida por los UEs

Análogamente al anterior, en [Hernández y otros, 2010] se definen máscaras de potencia con diferentes niveles que marcan la potencia de transmisión utilizada en cada recurso frecuencial con el fin de controlar la interferencia generada en otras celdas. El esquema de partición de recursos y máscaras de potencia aplicados se ilustra en la Figura 2.17. Es preciso puntualizar que aunque cada subbanda B0, B1 y B2 podría ser potencialmente utilizada por cualquiera de los sectores de la celda, los RBs solo pueden ser finalmente asignados en uno de los sectores. En el caso específico de aplicar una sectorización pura, cada subbanda se divide en 3 bandas más pequeñas, asignadas de forma rígida a cada uno de los sectores, tal y como se visualiza en la Figura 2.17. No obstante, a diferencia del esquema mostrado en la Figura 2.16, gracias a una adecuada permutación en las máscaras para celdas vecinas se consigue reducir la interferencia experimentada en el exterior de la celda.

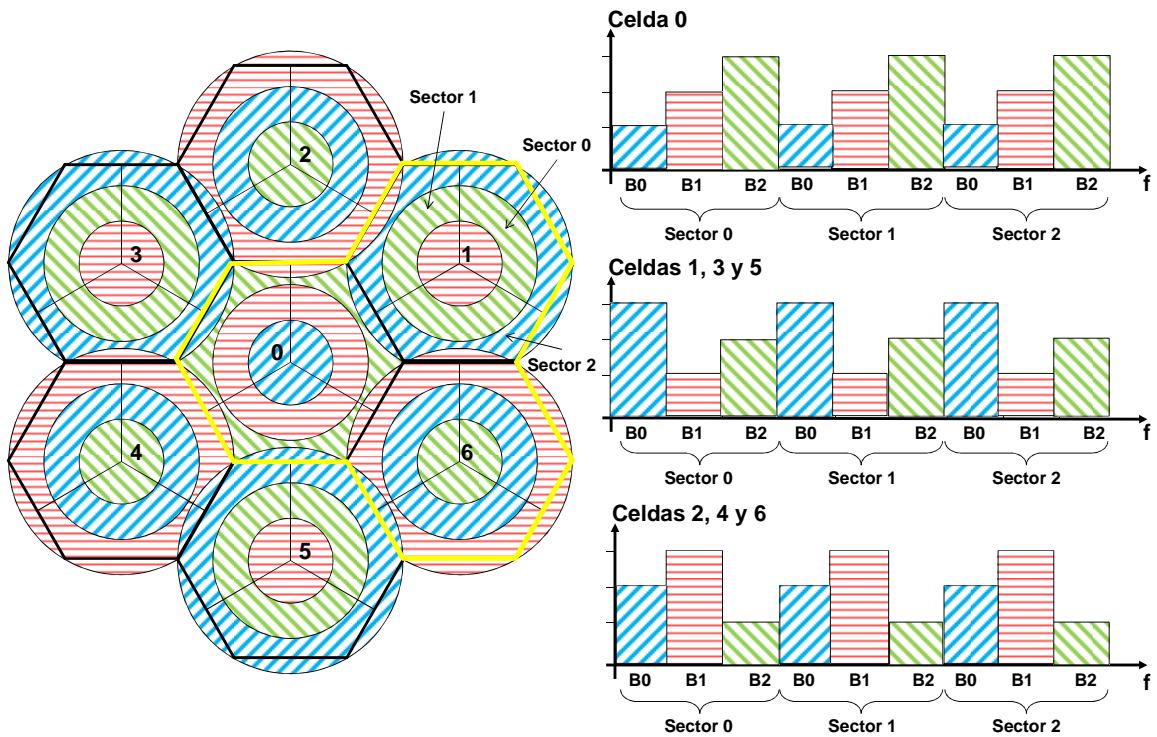


Figura 2.17: Sectorización con máscaras a nivel de celda

En cualquier caso, el problema con ambos esquemas (Figura 2.16 y Figura 2.17) es el bloqueo que surge al considerar una sectorización frecuencial pura, ya que no puede adaptarse convenientemente a distribuciones heterogéneas de carga. Aparece entonces la necesidad de aplicar esquemas de sectorización flexible que alivien esta restricción. Otra opción para evitar este bloqueo es utilizar esquemas de reúso más agresivos para obtener un aprovechamiento máximo del espectro. En este contexto surge el esquema de reúso frecuencial fraccional (FFR: *Fractional Frequency Reuse*), que se basa en la aplicación de diferentes factores de reúso frecuencial dentro de la celda: en el centro de la celda se aplica un reúso unidad para mejorar la accesibilidad a los recursos, ya que los usuarios interiores están mejor aislados frente a la ICI; en el exterior de la celda se utiliza un reúso 3 de modo que celdas vecinas utilicen recursos frecuenciales ortogonales para mantener unas condiciones de interferencia suficientemente buenas en los límites de la celda (o del sector). El esquema FFR, que fue propuesto por primera vez en [Halpern, 1983] para redes de primera generación, es la solución generalmente aceptada para las redes de banda ancha OFDMA, tanto WiMAX [Edt, 2006] como LTE [R1-050764, 2005].

En la literatura pueden encontrarse un gran número de variantes para el esquema FFR, que se pueden agrupar en tres grandes bloques. Por un lado, el esquema **soft-FFR** fue el primero en aparecer en el contexto de redes OFDMA y sigue siendo uno de los esquemas más comunes [R1-050764, 2005; Qian y otros, 2006; Zhu y otros, 2006; Bilios y otros, 2012]. El ancho de banda del sistema se divide en tres subbandas (Figura 2.18a): dos de ellas se asignan con reuso unidad para el interior de la celda (en color morado en la figura) mientras que la tercera se denomina subbanda exterior y se transmite con una mayor potencia para alcanzar el límite de la celda. Celdas vecinas utilizan un tercio distinto para sus usuarios exteriores, con lo que la interferencia sufrida por estos es menor.

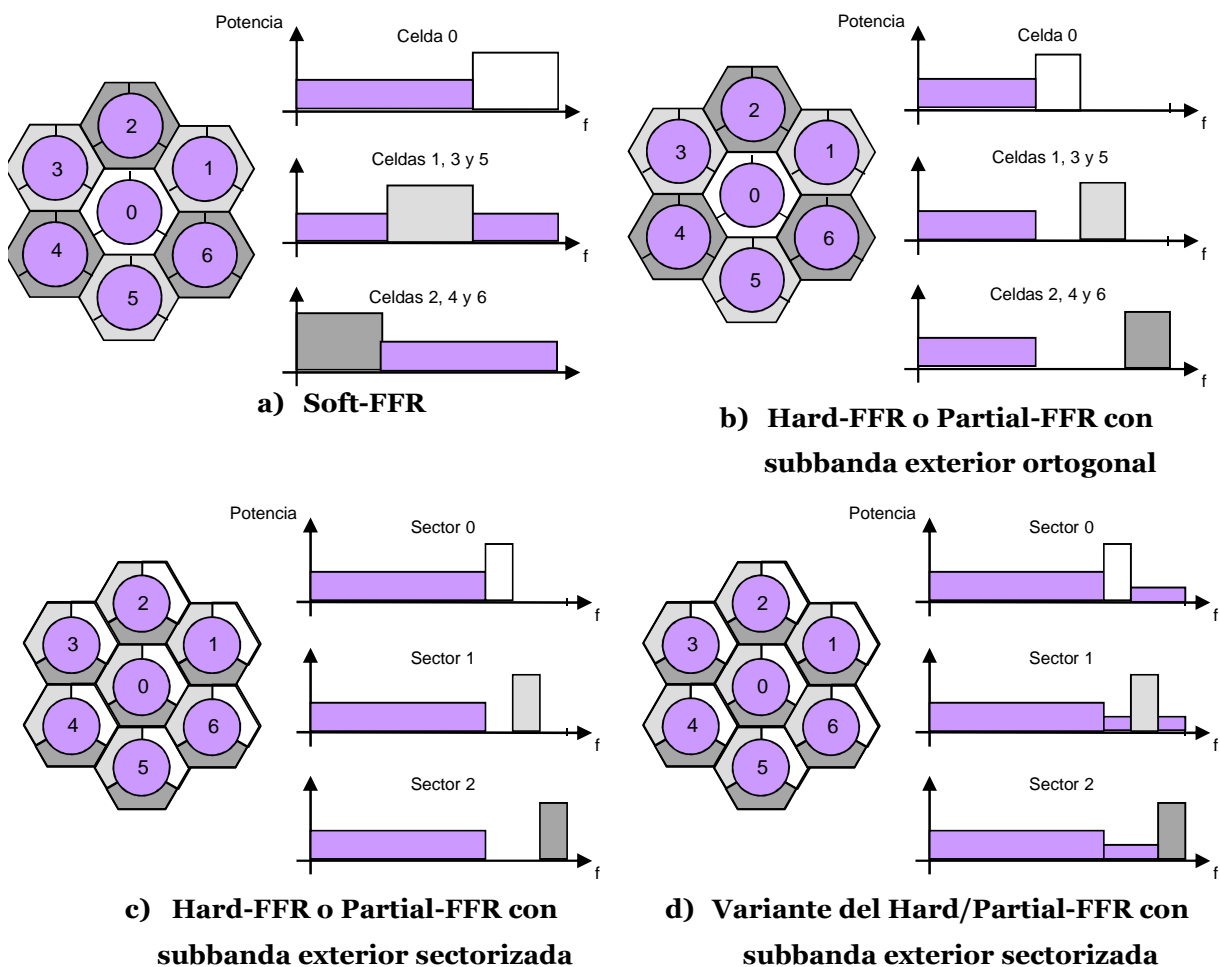


Figura 2.18: Esquemas FFR típicos para redes OFDMA

El acceso a esta subbanda exterior puede estar limitado exclusivamente a los usuarios del exterior de la celda [Hamouda y otros, 2009] o también puede ser utilizada por usuarios interiores con menor potencia de transmisión [Sarperi y otros, 2008]. La opción normalmente elegida es la segunda, puesto que permite un mejor aprovechamiento de los recursos en condiciones de alta carga al no limitar innecesariamente el acceso a los mismos.

El esquema soft-FFR permite asignar todos los recursos frecuenciales disponibles en el ancho de banda del sistema en todas las celdas del despliegue, lo que ofrece una elevada accesibilidad a los recursos radio. Sin embargo, los usuarios del exterior de la celda sufren interferencias de los usuarios interiores de las celdas vecinas. Puesto que en la subbanda interior se aplica reuso unidad (cualquier sector de la celda puede asignar los recursos frecuenciales), esta interferencia presentará una alta variabilidad y limitará enormemente las prestaciones obtenidas por los usuarios del exterior de la celda. Como respuesta a este hecho, aparece el esquema **hard-FFR**, también denominado **partial-FFR**, en el que las subbandas interior y exterior ocupan siempre recursos frecuenciales distintos a lo largo de toda la red. En la literatura pueden diferenciarse dos opciones para el esquema hard-FFR: subbanda exterior ortogonal y subbanda exterior sectorizada. En el primer caso [R1-050738, 2005; Giuliano y otros, 2008b; Porjazoski y Popovski, 2010], la subbanda exterior utilizada por celdas vecinas es ortogonal entre ellas (Figura 2.18b). En el segundo caso [Lei y otros, 2007; Chiu, 2008; Ali y Leung, 2009; Darwish y otros, 2011], los mismos recursos frecuenciales son utilizados por la subbanda exterior de todas las celdas, pero se aplica sectorización para controlar la interferencia entre celdas (Figura 2.18c). Ambas opciones consiguen estabilizar la interferencia en la subbanda exterior, lo que permite mejorar las prestaciones del sistema con respecto al esquema soft-FFR [Fraimis y otros, 2010; Lei y Di, 2010; Novlan y otros, 2010]. Sin embargo, en el caso de subbanda exterior ortogonal, el número de recursos frecuenciales que deja sin utilizar cada celda

es muy elevado, lo que disminuye enormemente la utilización del espectro. Es por esto que el esquema con subbanda exterior sectorizada es la opción preferida.

Por último, existen múltiples variantes generadas a partir de estos esquemas. Por ejemplo, en la Figura 2.18d se define una solución mixta [Kim y Jeon, 2011; Liu y otros, 2011]: partiendo de un esquema hard-FFR, la fracción de la subbanda exterior que no podía ser asignada por pertenecer a otro sector, puede utilizarse en el interior pero con una potencia de transmisión baja. Si bien este esquema reduce en primera instancia el bloqueo debido a que aumenta el número de recursos asignables, las prestaciones globales finalmente ofrecidas son peores que con hard-FFR, y especialmente para los usuarios exteriores debido al aumento de la interferencia en la subbanda exterior [Elayoubi y otros, 2008; Wu y Sakurai, 2009]. En base a todo lo argumentado anteriormente, el esquema que ofrece unas mejores prestaciones globales es el esquema hard-FFR básico con subbanda exterior sectorizada. Esta será la opción considerada en adelante como referencia de partida en este trabajo.

En redes tri-sectorizadas, que es el escenario contemplado en esta tesis, el tamaño de la subbanda exterior es típicamente $1/3$ del total, de modo que a nivel teórico, cubra $1/3$ del área de la celda. Existen sin embargo otras propuestas que abogan por factores de reuso menores en la subbanda exterior de modo que se incremente la utilización del espectro a costa de un incremento de la ICI para los usuarios exteriores. En [Ghaffar y Knopp, 2010], por ejemplo, se propone que cada celda utilice $2/3$ de la subbanda exterior (Figura 2.19a) en lugar del tercio mostrado en los algoritmos anteriores. En la misma línea, la propuesta de [Choi y otros, 2006] divide la subbanda exterior en 7 secciones y cada celda puede utilizar 3 de estas secciones (Figura 2.19b). En ambos casos, la ganancia en accesibilidad a los recursos se ve contrarrestada por un aumento importante de la interferencia en la zona exterior, donde los usuarios son más

sensibles a dicha interferencia. Para transmitir la misma cantidad de datos, los usuarios exteriores requerirán ahora un mayor número de RBs, con lo que prácticamente no hay ganancia efectiva con respecto al esquema normal de reuso 3 en el exterior.

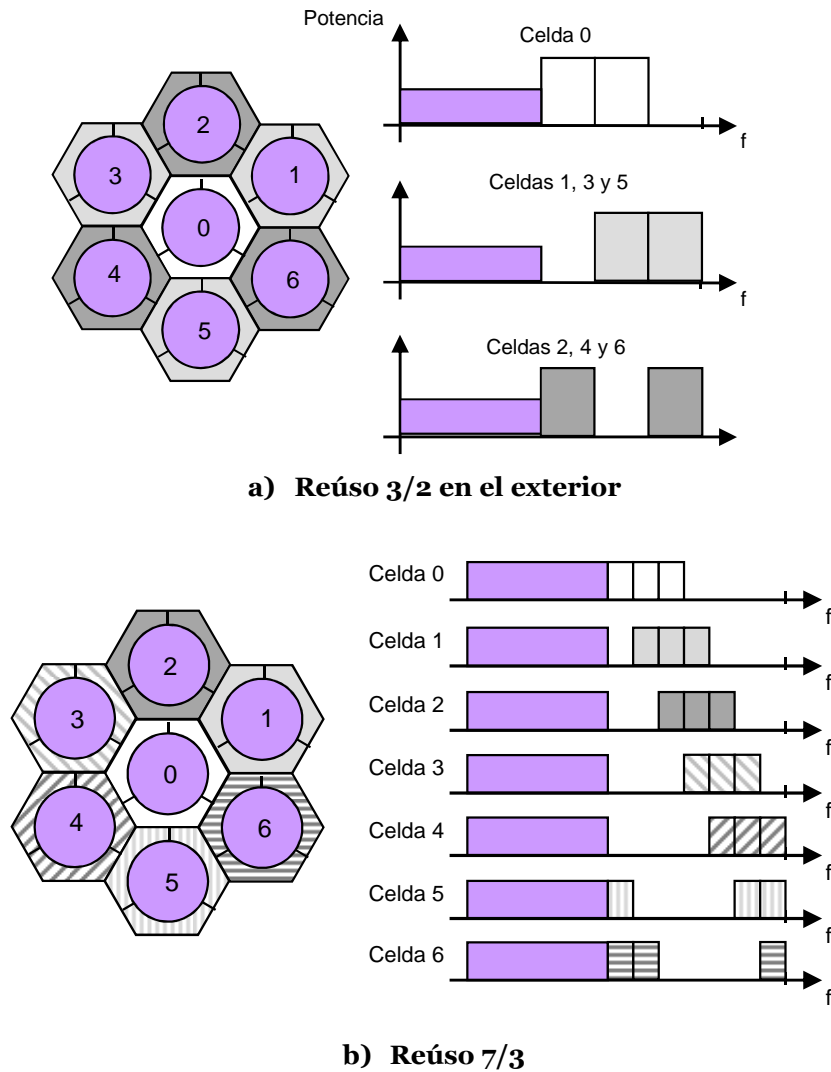


Figura 2.19: Esquemas FFR con menor reuso en la subbanda exterior

También con la intención de incrementar la utilización de recursos en la zona exterior, en [Xu, 2010] y [Fu y otros, 2010b] se propone dividir dicha subbanda en dos secciones, tal y como se muestra en la Figura 2.20: en el área próxima a los vértices entre celdas, la señal recibida de las tres BSs de las proximidades es similar, con lo que es necesario aplicar un reuso 3 como se ha

venido mostrando anteriormente. Sin embargo, en el resto del área exterior, la interferencia proviene principalmente de una única BS vecina, con lo que solo sería necesaria la coordinación con dicha celda. Tal y como se muestra en la figura, una correcta planificación de esta subbanda permite que sea utilizada 2 veces en tres celdas adyacentes (reúso 3/2), lo que posibilita mejorar el factor de reúso de RBs en la zona exterior. Sin embargo, este planteamiento supone aumentar la complejidad del scheduler, imponer un mayor número de restricciones en la asignación de RBs y, para su correcto funcionamiento, requiere un conocimiento preciso de la posición del usuario dentro de la celda. Por todas estas razones, este esquema no ha recibido mucha aceptación en el contexto de las nuevas redes OFDMA.

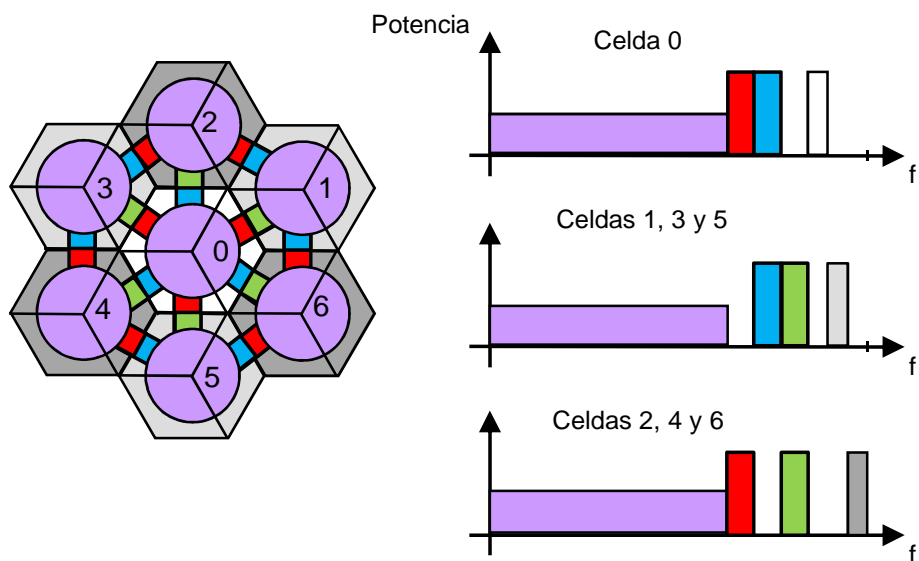


Figura 2.20: Esquemas FFR con zona adicional de reúso en el exterior

Esta predominancia de una BS interferente en determinadas zonas también se aprovecha en [Fang y Zhang, 2008] añadiendo una restricción adicional en la accesibilidad de algunos recursos frecuenciales para mejorar la calidad de la señal obtenida por los usuarios en dichas zonas. Por ejemplo, veamos el caso de la celda 0 en la Figura 2.21: los usuarios situados en el área marcada en rojo sufren una fuerte interferencia proveniente del sector 2 de la celda 2. Por tanto,

se propone definir ciertos RBs (marcados en rojo en la figura) que pueden ser asignados por el sector 0 o 1, pero no por el sector 2. Un razonamiento equivalente puede aplicarse para el área marcada en azul, que es interferida fuertemente por el sector 0 de la celda 4, o el área verde, que recibe una fuerte interferencia del sector 1 la celda 6. Este esquema permite aumentar la utilización de los recursos frecuenciales al reducir la zona de reuso 3 pero limita las libertades del scheduler al definir nuevas restricciones en el acceso a ciertos recursos radio. Además, es preciso conocer con bastante precisión las condiciones de canal observadas por los usuarios para determinar qué factor de reuso pueden recibir en la zona exterior. El trabajo referido no realiza un análisis detallado de la ganancia real de este esquema frente a un FFR básico considerando estos aspectos. Por último, en este caso, a diferencia del esquema anterior, las nuevas subbandas de reuso unidad a nivel de celda, no pueden usarse en los dos sectores afectados simultáneamente.

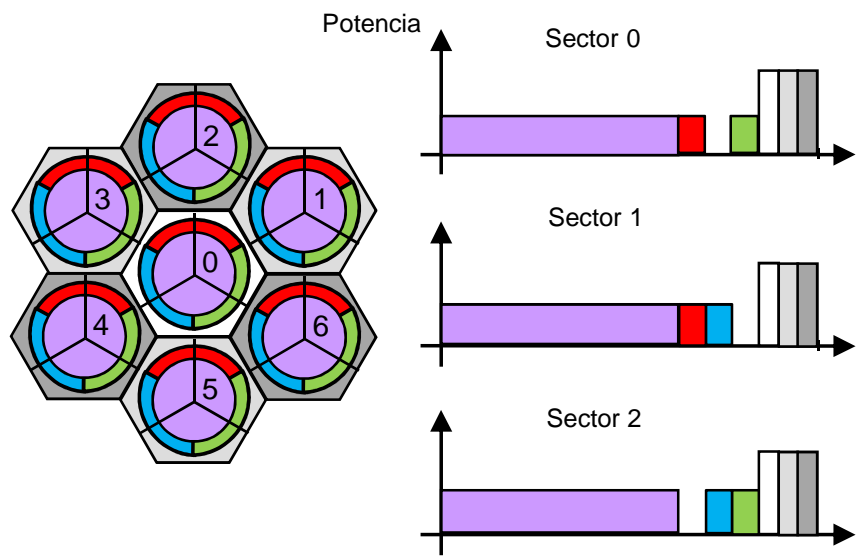


Figura 2.21: Esquemas FFR con zona adicional de reuso por ICI dominante

Los recursos frecuenciales de cada subbanda pueden estar mapeados en frecuencia de forma contigua, como en todas las propuestas anteriores, o análogamente de forma distribuida a lo largo del espectro [Kim y otros, 2009].

Esta última solución, mostrada en la Figura 2.22, ofrece una mayor diversidad frecuencial pero por norma general, se aplica un mapeado contiguo porque posibilita utilizar esquemas de CQI más simples que agrupen bandas contiguas para reducir la cantidad de señalización necesaria [Kolehmainen y otros, 2008].

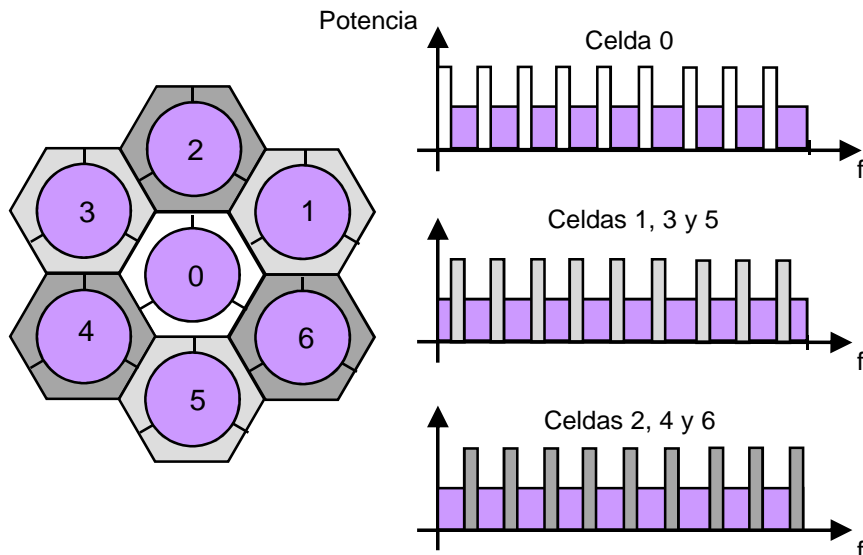


Figura 2.22: Esquemas FFR en frecuencia con mapeado distribuido

Las propuestas existentes para el esquema FFR se basan generalmente en un sistema de reuso fraccional en frecuencia de acuerdo con las descripciones efectuadas hasta el momento: ciertos recursos frecuenciales son asignados prioritariamente para los usuarios exteriores, creando así la subbanda exterior. El resto de recursos constituyen la subbanda interior donde se aplica reuso unidad. Sin embargo, existen también propuestas que definen un FFR en tiempo [Zhou y Zein, 2008; Xu y otros, 2009], de modo que existen subtramas o símbolos OFDM específicos con reuso 3 para asignar a usuarios del exterior de la celda, mientras en el resto se aplica reuso unidad (Figura 2.23). Este esquema acarrea un aumento la latencia en la transmisión de datos, ya que hay que esperar a la llegada de los recursos con reuso adecuado para servir al usuario. En el caso de FFR en frecuencia, sin embargo, existen simultáneamente recursos para el interior y para el exterior de la celda, con lo que la latencia en

las asignaciones será menor [Gao y otros, 2009]. Por consiguiente, este es el despliegue generalmente aceptado para las nuevas redes móviles OFDMA.

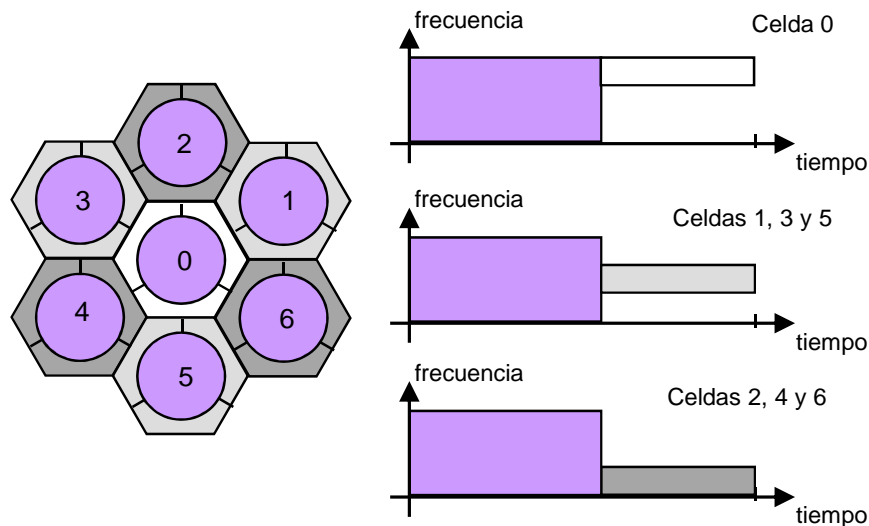


Figura 2.23: Esquema FFR en tiempo

Como se demostrará en capítulos posteriores, uno de los mayores problemas que presenta el esquema FFR en cualquiera de sus variantes (soft, partial...) es la variabilidad de la interferencia en la subbanda interior. Dado que en dos subtramas consecutivas el sector que utiliza un determinado recurso del interior puede ser distinto, la interferencia observada muestra grandes fluctuaciones que conducen a una estimación inexacta de las condiciones de canal en las que se producirá la transmisión a los usuarios. Este efecto lleva asociado un aumento del BLER que acaba por incrementar el retardo y el descarte de paquetes en la celda debido a que exceden la cota máxima de retardo del servicio. Esta situación se agrava en condiciones de baja carga pues los recursos frecuenciales pueden quedarse sin ser asignados, apareciendo el efecto ON-OFF antes mencionado. En concreto, en [Wu y Sakurai, 2009] se muestra que en condiciones de baja carga distribuida homogéneamente en la celda, una sectorización permite obtener una mayor capacidad al estabilizar la interferencia, mientras que a medida que la carga crece comienza a ser más interesante utilizar un esquema tipo FFR para evitar la aparición de bloqueo.

Esta idea, originalmente propuesta en [Zhu y otros, 2006] para el esquema soft-FFR, es extendida por [Cho y Lee, 2009] y [Xie y Walke, 2009] para el caso de hard-FFR: la subbanda interior se subdivide en tres secciones, cada una de las cuales se preasignan a un sector de la celda (sección rayada en la Figura 2.24). Cada sector comienza asignando recursos de su subbanda preasignada, por lo que en condiciones de baja carga, el esquema se comporta como una sectorización. Cuando los recursos de una sección han sido asignados completamente, el sector correspondiente comienza a asignar recursos de los otros sectores de la celda, con lo que se evita el bloqueo a costa de un aumento de la variabilidad de la interferencia. En esta tesis se propondrá un esquema de coordinación basado en esta idea, en la que además se aplicará una asignación con ordenación frecuencial para mejorar las prestaciones del esquema FFR [Hernández y otros, 2009].

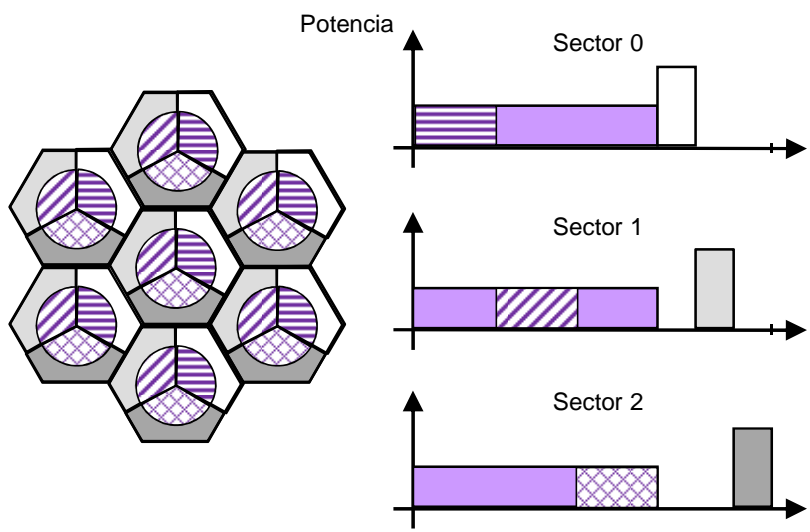
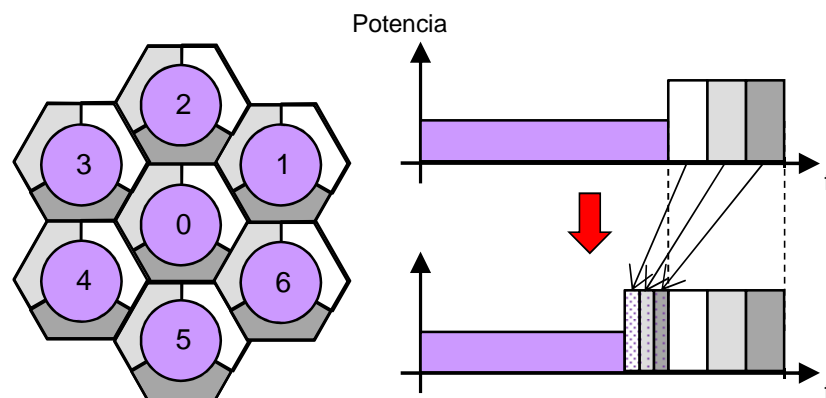


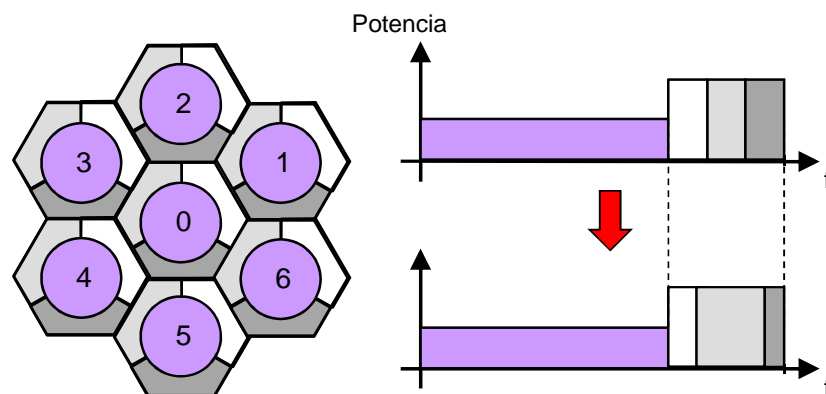
Figura 2.24: FFR con sectorización flexible en la subbanda interior

Al aplicar un reuso unidad para la subbanda interior, el esquema FFR resulta muy conveniente para hacer frente a distribuciones heterogéneas de carga en el interior de la celda. Los problemas de bloqueo podrían aparecer en la zona exterior de la celda, donde el reparto de RBs es inicialmente estático. Como solución a este problema, en [R1-051059, 2005] y [Xiang y otros, 2009] se

propone que si la carga en la zona exterior de la celda es elevada, se puedan traspasar recursos de la subbanda interior a la exterior manteniendo la sectorización (Figura 2.25a). Del mismo modo, para los casos en los que existe una carga heterogénea entre sectores en el exterior de la celda, en [Fu y otros, 2010a] se propone un reparto dinámico y coordinado de los RBs de la subbanda exterior de modo que se reduzca el bloqueo (Figura 2.25b). Estas modificaciones en el reparto de RBs en la subbanda exterior alteran de forma considerable el patrón de interferencias observadas por las celdas vecinas. Puede suceder por tanto que los usuarios exteriores de celdas vecinas dejen de recibir asignaciones ortogonales como sucedía en el caso estático, apareciendo una fuerte componente de ICI que puede hacer inviable la comunicación. Así, resulta imprescindible establecer algún tipo de coordinación entre celdas a la hora de



a) Ampliación de la subbanda exterior



b) Adaptación de la sectorización en la subbanda exterior

Figura 2.25: Ajuste dinámico de la subbanda exterior en FFR

modificar la subbanda exterior de alguna de ellas. En la literatura pueden encontrarse tres tipos de soluciones, cada una con sus pros y contras:

- *Coordinación centralizada*: en la red existe un nodo central (similar a una RNC) que recopila estadísticas de calidad del enlace y requerimientos de tráfico de los usuarios exteriores de las celdas bajo su control y decide las modificaciones en los RBs asignados a los usuarios exteriores [Ali y Leung, 2009; Rahman y Yanikomeroğlu, 2010; Fu y otros, 2010a]. Aunque en teoría este tipo de coordinación ofrecería las mejores prestaciones, está muy limitado por la cantidad de señalización necesaria en la red cableada para enviar las estadísticas de los usuarios al nodo coordinador y que este devuelva las indicaciones pertinentes, lo que acarrea además un aumento en el retardo de las actualizaciones. Para reducir la señalización hay que incrementar el tiempo entre decisiones del nodo central, lo que supone una merma en las prestaciones ofrecidas por este tipo de coordinación [Shurky y otros, 2009]. Por tanto, este método resulta solo indicado para seguir variaciones en la carga que se mantienen a lo largo de un periodo de tiempo grande.
- *Coordinación distribuida*: en estas propuestas, las estaciones base toman por sí mismas las decisiones de modificación del esquema de coordinación (no es necesario un nodo central) e indican dichos cambios a las celdas vecinas para evitar errores en la posterior asignación de recursos. En [Li y otros, 2009] y [Angelakis y otros, 2011] se propone un esquema de petición y liberación de RBs entre celdas vecinas: cuando una celda se encuentra en condiciones de sobrecarga, envía peticiones a las celdas vecinas para que le cedan RBs no ocupados de la subbanda exterior. Las celdas menos cargadas cederán entonces recursos hasta que el nivel de sobrecarga disminuya. El proceso de petición/liberación de RBs lleva asociada una elevada latencia como resultado del proceso de

negociación, por lo que no sería adecuado para lidiar con situaciones puntuales de sobrecarga. Por el contrario, la propuesta de [Mao y otros, 2008] se basa en intercambios continuos de señalización entre las BSs indicando el estado de carga de las celdas y la disponibilidad para ceder RBs del exterior. Así, cuando una celda observa sobrecarga, comprueba qué celda vecina está más descargada y ocupa algún recurso, enviando el correspondiente mensaje de señalización a la BS vecina para indicar qué recursos se ha ocupado y evitar así que sea asignado por ella también. Este proceso reduce enormemente la latencia, puesto que la celda sobrecargada sabe desde un primer momento qué recursos puede ocupar, pero supone una carga notable de señalización a través del backhaul. En la literatura no se han encontrado estudios precisos que muestren el impacto real en el retardo debido a las decisiones de modificación de la coordinación y de la cantidad real de señalización necesaria, aunque a priori, los esquemas basados en coordinación distribuida parecen más adecuados para las redes móviles de banda ancha que los basados en un nodo central coordinador.

- *Coordinación sin señalización:* en esta última opción no existe señalización entre celdas para modificar la subbanda exterior. A modo de ejemplo, en [R1-051341, 2005] se propone que las celdas asignen recursos exteriores a sus usuarios en un orden frecuencial determinado, mientras que cuando una celda ha de ocupar recursos exteriores de otras celdas, lo hace en el orden inverso (Figura 2.26). De este modo, solo se producirán colisiones en condiciones de alta carga. Sin embargo, en este caso es difícil garantizar la suficiente calidad de señal a los usuarios exteriores y el scheduler cometerá más errores en la asignación de recursos. En la propuesta de [Qian y otros, 2006] y [Krasniqi y otros, 2009], cada celda modifica el tamaño de la subbanda interior y exterior independientemente del resto con el objetivo de maximizar la tasa

servida en la celda. Este planteamiento lleva a que la mayor parte de los recursos de la celda se dediquen a la subbanda interior, ya que de este modo se maximiza la tasa cursada por la celda.

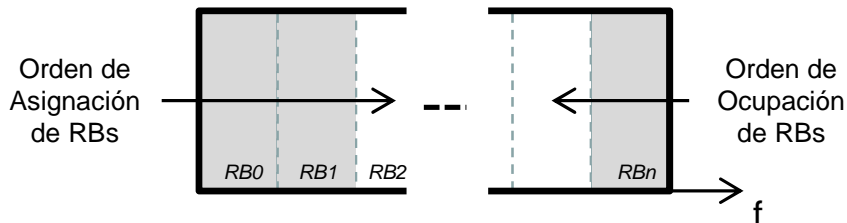


Figura 2.26: Distinto orden en la asignación y ocupación de la subbanda exterior

En cualquiera de los tres escenarios anteriores, las prestaciones ofrecidas por los esquemas de adaptación del mecanismo de coordinación no son fácilmente evaluables. La escala temporal de esta adaptación es grande para evitar un gran flujo de señalización o un comportamiento muy variante del sistema. Por tanto, para apreciar un cambio en las prestaciones, la carga de las celdas debe mantenerse estable durante un largo periodo de tiempo. En un sistema real, donde se produce una combinación estadística de los tráficos de muchos usuarios, es posible que se den escenarios en los que sea complicado que estas condiciones se mantengan durante el suficiente tiempo. Es por esto que en la mayor parte de las contribuciones se considera un esquema estático ya que las prestaciones finalmente ofrecidas por el sistema serán similares y la dificultad de implementación del mismo es mucho menor. No obstante, es importante tener en cuenta que las distribuciones de usuarios y servicios no tienen por qué ser homogéneas a largo plazo, lo que implica que necesariamente se tienen que negociar optimizaciones en la distribución de recursos con respecto a la implementación básica de los esquemas FFR.

En un intento por incrementar la capacidad de la celda, en la literatura pueden encontrarse propuestas de un esquema FFR con reuso unidad a nivel de sector [Sternad y otros, 2003; Xiang y otros, 2007; Tarantetz y otros, 2011]: los

recursos frecuenciales del interior de la celda pueden ser asignados simultáneamente por todos los sectores de la celda. Este esquema de reuso intensivo se puede aplicar en cualquiera de las variantes del esquema FFR descritas anteriormente. Al reutilizarse los recursos frecuenciales dentro de la celda, aparece entonces una fuerte componente de interferencia intersector, que es especialmente perjudicial para los usuarios situados en la frontera entre sectores [Castañeda y otros, 2007; Charafeddine y Paulraj, 2009]. La solución típica a este problema pasa por definir una nueva zona de reuso en el límite entre dos sectores de la celda [Sezginer y Sari, 2009], la *zona de frontera*. Los usuarios situados en dicha zona pueden ser asignados en subportadoras donde se impone un reuso unidad a nivel de celda para evitar la interferencia intersector. Con esta nueva zona de reuso se pretende evitar que cuando un sector transmite a un usuario de la frontera en un determinado recurso frecuencial, ese mismo recurso sea asignado por el sector adyacente. Este esquema se puede entender como una extensión del hard-FFR con sectorización en el exterior para el caso de reuso unidad a nivel de sector, como se muestra en la Figura 2.27. Sin embargo, reservar más recursos con reuso unidad puede llevar a limitaciones en la accesibilidad a los recursos.

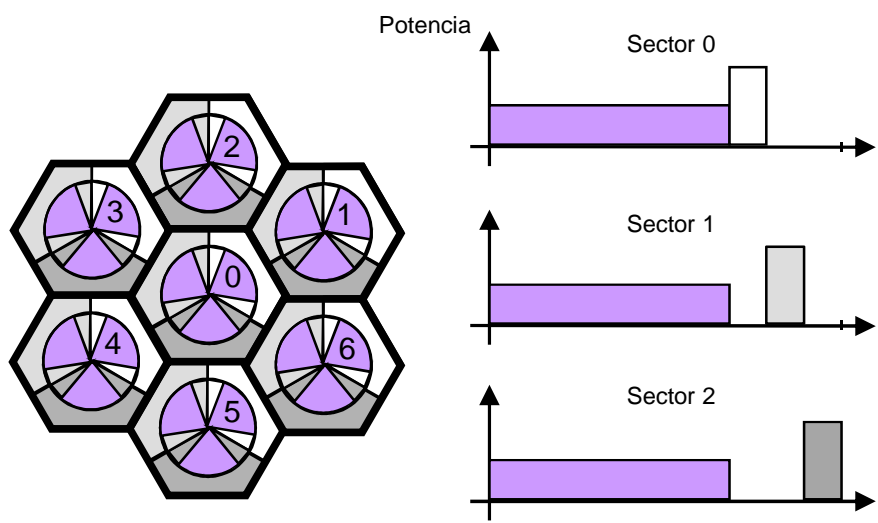


Figura 2.27: FFR para reuso a nivel de sector

En cuanto a los usuarios del interior de la celda, las propuestas anteriores asumen una asignación libre de los recursos interiores, con lo que un RB podría ser asignado simultáneamente por los tres sectores de la celda mientras otros quedan libres. Resultará más conveniente realizar en la medida de lo posible un reuso más equilibrado para evitar que las condiciones de interferencia en determinados recursos sean muy malas, lo que conduce a una pérdida general de throughput [Lee y otros, 2006]. Para evitar este hecho, en [Wang y otros, 2008] se propone una reasignación ordenada de recursos de modo que un determinado RB solo es asignado por tercera vez cuanto todos han sido asignados ya dos veces. Este procedimiento permite evitar que ciertos recursos frecuenciales sufran una fuerte interferencia intersector mientras otros no están prácticamente interferidos. De todas formas, los trabajos anteriormente referidos sobre el reuso unidad a nivel de sector no ofrecen una idea clara de la ganancia real experimentada en el sistema cuando se aplica este reuso intensivo de recursos. Algunos trabajos se centran únicamente en estimar el impacto en SINR debido al reuso unidad a nivel de sector, sin considerar su efecto real sobre la provisión de QoS. En los casos en los que las prestaciones del reuso unidad a nivel de sector se comparan con el esquema de reuso unidad a nivel de celda, se parte de escenarios simplificados donde no se tienen en cuenta aspectos críticos como por ejemplo, la multiplexación estadística de los distintos tráficos de los usuarios, con lo que no es posible obtener una estimación de la ganancia que se podría obtener en un sistema real. En el capítulo 5 de este trabajo se presentarán una serie de algoritmos de asignación de recursos para el caso de reuso unidad a nivel de sector y se evaluarán sus prestaciones en cuanto a capacidad y satisfacción de QoS en condiciones realistas, comparándolas con un esquema de reuso unidad a nivel de celda.

En resumen, en la literatura pueden encontrarse un gran número de propuestas sobre la coordinación de interferencias en redes OFDMA. Sin embargo, en lo sustancial no suponen un avance significativo con respecto a las propuestas iniciales en cada caso. Tanto la sectorización frecuencial como el esquema FFR, que fueron definidos para las primeras redes celulares, siguen siendo con ligeras modificaciones, los esquemas más comunes en las nuevas redes de banda ancha. Estos esquemas imponen una serie de restricciones en cuanto al acceso de los usuarios que deberán ser consideradas por los algoritmos de scheduling subyacentes para obtener un aprovechamiento máximo de los escasos recursos radio disponibles haciendo uso de la diversidad multiusuario y de la combinación estadística del tráfico en redes de conmutación de paquetes. En este sentido, la mayor parte de los trabajos referidos anteriormente analizan los distintos esquemas de coordinación de interferencias desde un punto de vista de calidad de señal recibida por los usuarios: la efectividad de un mecanismo de coordinación concreto se mide por su capacidad para mejorar la SINR promedio observada por los usuarios exteriores mediante la aplicación de restricciones en el acceso a los recursos radio. Sin embargo, en la mayor parte de los casos no se estudia el impacto que tales restricciones tienen sobre las prestaciones del sistema al limitar las libertades de asignación del scheduler. Y en los casos en los que el mecanismo de coordinación de ICI se analiza junto con un algoritmo de scheduling, la evaluación suele ser simple, considerando algoritmos de scheduling muy sencillos y evaluados en condiciones poco realistas. Por ejemplo, muchos trabajos suponen un conocimiento ideal del canal por parte del scheduler o utilizan para su análisis servicios *best-effort* que no permiten evaluar la capacidad de la solución presentada para proporcionar QoS a los usuarios del sistema. Por el contrario, en este trabajo se presenta un esquema de coordinación basado en hard-FFR que permite estabilizar la ICI y cuyas prestaciones serán evaluadas junto con diferentes algoritmos de scheduling en

condiciones realistas, tanto desde el punto de vista de limitaciones del propio sistema como de requisitos de QoS de los servicios demandados por los usuarios.

2.3 Scheduling de recursos radio y provisión de QoS

La asignación dinámica de recursos radio, denominada genéricamente como *scheduling*, engloba las funciones encargadas de gestionar de forma eficiente los recursos radio disponibles en la celda de modo que, haciendo uso de las técnicas de adaptación del enlace existentes, se asegure la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios [Holma y Toskala, 2009]. Son muchos los factores que hay que tener en cuenta en el scheduling para extraer el máximo partido de los recursos radio en sistemas de conmutación de paquetes. Por una parte, los usuarios pueden exigir una gran variedad de servicios por parte del sistema, cada uno de los cuales tiene parámetros y requisitos distintos. Por otro lado, la cantidad de datos que se pueden transmitir a los usuarios viene determinada por el estado de los buffers en cada momento, por las condiciones de canal en las que se encuentre el usuario y por las asignaciones realizadas a otros usuarios, ya que los recursos radio disponibles en la celda son finitos y han de ser compartidos entre todos ellos. Además, el reparto de dichos recursos debe de cumplir con las restricciones impuestas por el mecanismo de coordinación de interferencias aplicado, que como hemos visto en el apartado anterior, limita los recursos tiempo-frecuencia y la potencia con que pueden ser asignados los usuarios dentro de la celda.

Los algoritmos de scheduling no están incluidos en los estándares de comunicaciones móviles, sino que se dejan abiertos a la implementación de los fabricantes de equipos radio. Es por esto que en los últimos años, la asignación de recursos en redes móviles OFDMA ha concentrado un gran esfuerzo investigador. Por lo general, son tres los recursos a gestionar en la celda: las

subportadoras OFDM (y análogamente los RBs), la potencia de transmisión y la tasa transmitida en las asignaciones a cada usuario, esto es, la MCS aplicada. Resulta de vital importancia realizar una gestión eficiente de estos recursos pues determinará las prestaciones ofrecidas por la celda y el aprovechamiento obtenido de los recursos disponibles. El problema, ya de por sí complejo, se agrava cuando la provisión de QoS a los usuarios es otro requerimiento añadido. Las libertades que ofrece la asignación de estos tres recursos hacen que en la literatura puedan encontrarse un gran número de soluciones con diferentes enfoques, que analizaremos a continuación en función de sus distintas características.

La Figura 2.28 muestra el modelo esquemático de un algoritmo de scheduling genérico, que será utilizado en el diseño de algoritmos de scheduling a lo largo de esta tesis. La tarea de scheduling comprende dos grandes bloques íntimamente relacionados entre sí. Por un lado, el *Scheduling Frecuencial* o *Frequency Domain Scheduling* (FD Scheduling) tiene como objetivo obtener un aprovechamiento máximo de los recursos radio disponibles proporcionando la asignación de recursos más eficiente para la celda. Para ello, el scheduling frecuencial explotará la diversidad multiusuario, asignando principalmente a cada usuario en los RBs donde observe unas mejores condiciones de canal. Por otra parte, el *Scheduling Temporal* o *Time Domain Scheduling* (TD Scheduling) va orientado a garantizar la QoS de los distintos servicios por medio de la priorización de los tráfico a la hora de recibir recursos.

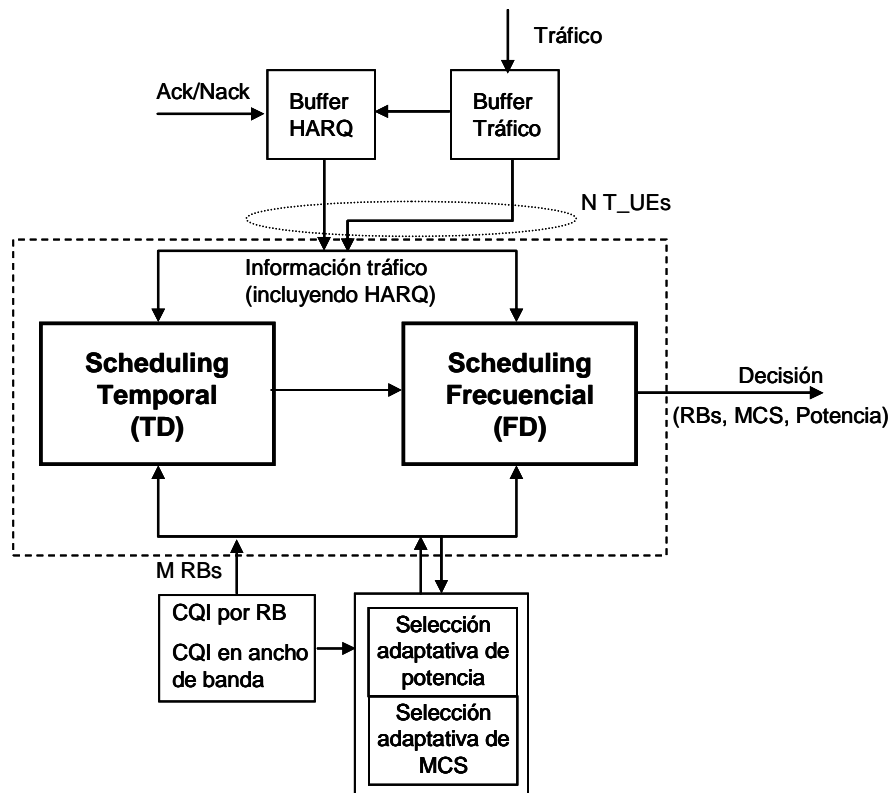


Figura 2.28: Modelo general de un algoritmo de scheduling completo

Más allá de esta propuesta, si se analiza el problema de la asignación de recursos, para obtener unos resultados óptimos en la utilización de los recursos radio, cada celda debería gestionar todos los recursos disponibles (RBs, potencia y tasa) de forma simultánea, considerando en cada TTI la multiplexación estadística de tráfico y la diversidad multiusuario, al tiempo que se garantiza el cumplimiento de la QoS de los servicios cursados en la celda. La consideración conjunta de todos estos factores supone una complejidad muy elevada en los algoritmos de scheduling debido al gran número de factores que el scheduler debe tener en cuenta simultáneamente en el momento de determinar la asignación. De hecho, en el contexto de redes OFDMA, en un primer momento se propusieron algoritmos exclusivamente dirigidos a gestionar la asignación de potencia, subportadoras o tasa de transmisión, sin considerar aspectos relativos a la naturaleza del tráfico o servicio. Es decir, el objetivo único era obtener el máximo partido de la diversidad multiusuario

propia de los sistemas OFDMA. En concreto, en la literatura se pueden encontrar algoritmos para la asignación de potencia y/o subportadoras encaminados a minimizar la potencia total transmitida en la celda o bien maximizar la tasa servida en la celda. En el primer caso, seleccionan los RBs que permiten minimizar la potencia transmitida considerando requisitos de tasa específicos de cada usuario [Wong y otros, 1999a]. En el segundo caso, la maximización de la tasa servida en la celda se obtiene asignando la mejor MCS posible de acuerdo con las condiciones de canal de los usuarios [Jang y Lee, 2003] en un contexto de potencia de transmisión constante. En ambos casos, las propuestas se desarrollan en un escenario *full-buffer*, es decir, asumiendo que todos los usuarios tienen datos pendientes de ser transmitidos. Dichos esquemas serán analizados en mayor detalle más adelante ya que, a pesar de sus limitaciones, pueden servir de base para el diseño de algoritmos de scheduling frecuencial más genéricos. Sin embargo, en un escenario más realista en el que los usuarios utilizan distintos servicios multimedia, la cantidad de datos existentes en los buffers de cada usuario varía de un TTI a otro. Por tanto, la selección de RBs y MCSs no dependerá solo de las condiciones de canal, sino también de la cantidad de datos a transmitir para cada usuario, obteniendo de este modo un mayor aprovechamiento del espectro.

Muchas de las propuestas que pueden encontrarse en la literatura sobre el scheduling frecuencial se basan en un planteamiento matemático enunciado como un problema de maximización o minimización convexa sujeta a un conjunto determinado de restricciones [Krongold y otros, 2000; Shen y otros, 2003; Chang y Kuo, 2004; Fodor y Koutsimanis, 2008]. Estos algoritmos son capaces de ofrecer una solución óptima al problema de asignación pero con un coste computacional elevado. Sin embargo, la solución obtenida puede no ser viable en un escenario real, ya que cualquier asignación de recursos puede ser solución al problema. Este hecho no es asumible puesto que requeriría una gran cantidad de señalización. En otros casos, es necesario llegar a suposiciones

inverosímiles en un caso real con el fin de que el problema de asignación sea resoluble. La potencialidad de los métodos matemáticos se reduce todavía más cuando hay que aplicar restricciones adicionales en la asignación de recursos, como pueden ser las derivadas del esquema de coordinación de ICI o limitaciones específicas del sistema, como que en el caso de LTE, la mínima cantidad de recursos asignable es un RB. Surgen entonces los algoritmos heurísticos, que son capaces de ofrecer una solución subóptima con un coste computacional mucho menor. Por norma general, se basan en sucesivas iteraciones que se van aproximando a la solución final, por lo que no resulta muy costoso aplicar restricciones adicionales debidas a los mecanismos de coordinación de interferencias. Por estas razones los algoritmos heurísticos se han convertido en la solución preferida para la asignación de recursos radio en redes celulares OFDMA.

En un primer momento, las propuestas para la asignación de recursos radio se centraban en escenarios con una única celda en los que las decisiones de reparto de recursos se realizaban asumiendo un determinado nivel del ruido [Rhee y Cioffi, 2000; Pietrzyk y Janssen, 2002]. En los sistemas 3G, dado que la señal transmitida se componía normalmente de la suma de un gran número de secuencias código solapadas, la interferencia experimentada se acaba asemejando a un ruido, por lo que esta aproximación puede ser aceptable. Sin embargo, en las redes celulares basadas en OFDMA, el número de fuentes interferentes es reducido (típicamente una señal interferente por celda o sector circundante) y dicha interferencia intercelular tiene un efecto determinante en las prestaciones ofrecidas por el sistema. Es por esto que en el diseño de algoritmos de asignación de recursos se debe tener en cuenta de forma explícita el entorno multicelular y considerar así el impacto de la ICI en las prestaciones del sistema. En este entorno multicelular, en la literatura también pueden encontrarse distintas propuestas para la asignación de recursos radio de forma centralizada, es decir, en la red existe un elemento que asigna de forma

coordinada los recursos radio entre un número de celdas de modo que se obtenga un control más ajustado de la ICI y que las prestaciones globales sean mejores [Abrardo y otros, 2007; Amzallag y otros, 2007; Alsawah y Fijalkow, 2008; Chang y otros, 2009; Fodor y otros, 2009; Ghaffar y Knopp, 2010; Rahman y Yanikomeroğlu, 2010]. Este planteamiento, requiere un flujo constante de señalización a través del backhaul entre las estaciones base y el elemento coordinador, que eventualmente podría estar localizado físicamente en una de ellas o ser un elemento separado. En cualquier caso, esta arquitectura de red se traduce en una elevada latencia en todos los procedimientos de gestión del enlace radio. Sin embargo, en el diseño de las nuevas redes móviles de banda ancha se ha marcado como objetivo reducir drásticamente la latencia de los servicios para mejorar la experiencia de usuario. En esta línea, los planteamientos distribuidos resultan más atractivos. Además, como ya se ha apuntado con anterioridad, para reducir la latencia en la gestión de las transmisiones dentro de cada celda se imponen arquitecturas de red planas: toda la inteligencia en lo que se refiere a la gestión de recursos radio se concentra en la estación base. Esto permite una adaptación más rápida del scheduling a las condiciones cambiantes del canal y del tráfico, lo que redundará en un incremento de la eficiencia y una adaptación más precisa del sistema para la provisión de QoS diferenciada. Volviendo a la coordinación de los algoritmos de asignación de recursos entre celdas, algunos trabajos, como es el caso de [Lv y otros, 2009], proponen algoritmos para planteamientos distribuidos en los que durante el scheduling, las BSs intercambian información de las asignaciones que van realizando, de modo que tras sucesivas iteraciones se alcance una solución global satisfactoria para el cluster de celdas. Como en el caso anterior, este planteamiento implica una elevada latencia en el procedimiento de asignación de recursos, además de un alto coste de señalización, que impiden que sea viable en sistemas reales. Es por esto que la opción preferida en el diseño de esquemas de scheduling en redes móviles de

banda ancha OFDMA asume que cada BS asigna de forma autónoma los recursos radio de su celda, asumiendo las restricciones impuestas por el esquema de coordinación de interferencias, que puede adaptarse de forma semi-estática, siguiendo un algoritmo de adaptación lenta que permitiría ajustar los parámetros de funcionamiento y coordinar los recursos frecuenciales repartidos entre los diferentes nodos a las condiciones cambiantes de carga derivadas de la activación de servicios o de la movilidad de terminales.

Este planteamiento basado en que cada BS realiza de forma independiente las asignaciones de recursos será la opción que seguiremos a lo largo de este trabajo. En concreto, la tesis se centra en la gestión dinámica, a escala de milisegundo (duración de la subtrama LTE), que permite el ajuste optimizado de las estrategias de scheduling (gestión de recursos frecuenciales, temporales y potencia) a la variabilidad y requerimientos del tráfico de los servicios y a las condiciones de canal de los usuarios, así como en el diseño de estrategias de coordinación de la ICI en condiciones semi-estáticas de distribución de carga, pero dejando a un lado los ajustes lentos del esquema de coordinación.

Centrándonos en la gestión dinámica de recursos radio, a medida que se generalizaba el uso de servicios multimedia a través de redes móviles, la provisión de QoS diferenciada a los usuarios se convertía en un requisito fundamental en los algoritmos de scheduling. Más allá de la mera maximización de la tasa global o minimización de potencia, el criterio para la selección de los usuarios que deben transmitir en un instante de scheduling, tiene que ver con la garantía de sus requisitos de QoS en términos de tasa y/o latencia. Esto es, de entre aquellos usuarios con datos pendientes, parece lógico priorizar, de acuerdo con una estrategia de scheduling temporal determinada, aquellos que tengan menor satisfacción de su QoS, obteniendo estos una mayor probabilidad de recibir recursos. El objetivo es conseguir estrategias de reparto equitativo de recursos de acuerdo con estos parámetros, al mismo tiempo que eficientes desde

el punto de vista del uso de los recursos radio. Aunque obviamente la opción más eficiente es el diseño de estrategias de scheduling que consideren conjuntamente el scheduling frecuencial y temporal, lo cierto es que resultan complejas de implementar. Así, el scheduling temporal puede separarse del frecuencial como dos tareas independientes [Pokhariyal y otros, 2007]: al inicio de cada TTI se calcula la prioridad de asignación de cada conexión de acuerdo con el criterio de scheduling elegido y los recursos son asignados siguiendo ese orden de prioridad. Este planteamiento supone una menor complejidad de implementación y será utilizado para la evaluación preliminar de estrategias de coordinación de ICI en el capítulo 3. No obstante, dado que la prioridad de las conexiones se calcula exclusivamente al inicio del TTI, este esquema no permite seguir la evolución de la satisfacción de la QoS de cada conexión a medida que se van asignando los recursos en un TTI. Resulta por tanto más conveniente considerar esquemas en los que la prioridad de asignación se va actualizando cada vez que se asignan recursos [Wong y otros, 1999a], ya que de este modo es posible gestionar con mayor precisión la QoS ofrecida por el sistema.

De acuerdo con el esquema genérico de la Figura 2.28, en cada TTI el algoritmo de scheduling determina el reparto de recursos más eficiente para la celda en función de dos entradas: el estado de los buffers del usuario y las condiciones de canal hacia cada uno de ellos. En el caso del enlace descendente, que es el ámbito en el que se centra esta tesis, la BS lleva perfecta cuenta del cumplimiento de QoS de los distintos servicios, con lo que es capaz de determinar por medio del scheduling temporal la prioridad de las distintas conexiones. Por otro lado, puesto que los buffers de cada conexión se sitúan en la propia BS, el scheduler es capaz de conocer instantáneamente el estado de los buffers de cada usuario. Cuando el servicio exige la recepción de paquetes de datos sin errores, como por ejemplo un servicio de transferencia de ficheros FTP, es necesario habilitar un mecanismo de ARQ (*Automatic Request Response*) para la retransmisión de paquetes erróneos. La estandarización de los modos de

ARQ en LTE, incluido el modo HARQ (*Hybrid Automatic Request Response*), se encuentra en [TS36.300, 2010] y [TS36.321, 2012]. El scheduler debe integrar perfectamente la temporización de dicho proceso pues influye de forma determinante en el retardo de transmisión de los bloques de datos. En los nuevos sistemas de banda ancha, la temporización del mecanismo de HARQ está por debajo de los 10ms, con lo que es posible aplicar retransmisiones incluso en servicios de tiempo real, como los servicios de voz. Los paquetes pendientes de ser retransmitidos tendrán más prioridad que los nuevos paquetes generados, de modo que el retardo general experimentado en la conexión sea más bajo.

La otra entrada fundamental que utiliza el scheduler para determinar la asignación de recursos es el estado del canal hacia cada usuario, reportado por los usuarios por medio de los CQIs. Con el fin de extraer el máximo beneficio de la diversidad multiusuario, el scheduler debe conocer el estado del canal hacia cada usuario para de este modo determinar qué RBs son los más convenientes para él y con qué potencia y MCS es posible transmitirle datos con una tasa de BLER determinada. Muchas propuestas para la asignación de recursos radio asumen un conocimiento ideal del canal, es decir, el scheduler conoce el estado instantáneo del canal por el que va a realizar la transmisión de datos. Sin embargo, en un sistema real existe un retardo entre las medidas realizadas por el usuario y su uso en el scheduler debido al propio mecanismo de reporte del CQI [Pedersen y otros, 2007]. Dado que el canal es un medio variante, existirá un cierto error en la estimación de las condiciones de canal que deberá ser asumido por los algoritmos.

El estándar LTE define dos mecanismos de CQIs [TS36.213, 2009]: el CQI periódico y el CQI aperiódico. El primero es el mecanismo básico de reporte de calidad del enlace, donde la BS indica al UE la periodicidad con la que debe enviar el reporte, así como las subbandas acerca de las que debe enviar

información. La periodicidad con la que el UE reporta información del canal debe ser suficiente como para seguir las variaciones del canal y dar así soporte al scheduling frecuencial. Por otro lado, el CQI aperiódico es ordenado por la BS para obtener un conocimiento más detallado de alguna subbanda en concreto. Puesto que la unidad mínima de asignación de recursos en el sistema es el RB, la granularidad máxima del CQI debe ser también el RB, lo que evita una gran cantidad de señalización asociada al CQI. De hecho, la ganancia real obtenida por el sistema cuando se reporta el estado del canal en cada una de las subportadoras del RB frente a un valor promedio en el RB es mínima [Chee y otros, 2004]. En cuanto a la información que se transmite en cada CQI, existen un gran número de propuestas. En los sistemas reales, como es el caso de LTE, los CQIs solo pueden tomar un conjunto de valores finitos, con lo que el UE debe hacer una cuantificación de la medida real del canal a los valores definidos por el sistema. Este hecho implica un cierto error a la hora de realizar una asignación de recursos precisa, pero evita que el tamaño de los CQIs sea demasiado grande, lo que consumiría gran parte de recursos del uplink.

En resumen, las propuestas que se presentarán en esta tesis se enmarcan dentro de sistemas de banda ancha sobre tecnología OFDMA que, como en el caso de LTE, concentran la inteligencia de scheduling en la BS. De este modo, cada celda es responsable de obtener un aprovechamiento máximo de los recursos radio disponibles al tiempo que se garantiza el cumplimiento de los requisitos de QoS de los usuarios. Aunque se analizarán también algunas propuestas que se basan en un planteamiento matemático, las limitaciones que estos esquemas presentan en cuanto a la viabilidad de la solución hacen que nos decantemos por algoritmos heurísticos en los que es más sencillo incorporar las restricciones derivadas de la aplicación de los algoritmos de scheduling en sistemas reales.

El resto del capítulo se articula como sigue: en el subapartado 2.3.1 se describen distintas propuestas que pueden encontrarse en la literatura para el scheduling frecuencial en redes móviles de banda ancha. Estos algoritmos no tienen en cuenta los requisitos de tráfico de los distintos usuarios puesto que buscan obtener una utilización máxima de los recursos radio disponibles en la celda. En la sección 2.3.2 se detallarán distintas propuestas que tienen en cuenta la provisión de QoS al usuario a través de esquemas de scheduling temporal y que pueden ser de utilidad en las redes móviles de banda ancha OFDMA.

2.3.1 Propuestas para el Scheduling Frecuencial

El scheduling frecuencial se encarga de la asignación de los recursos radio de la celda con el fin de obtener un aprovechamiento máximo de los mismos de acuerdo con un determinado criterio. Idealmente, la solución proporcionada debería elegir para cada usuario, las mejores subportadoras (o equivalentemente RBs) donde pueda transmitir con la mayor tasa posible y con un consumo de potencia reducido. Los algoritmos de scheduling frecuencial no pretenden por tanto garantizar la QoS de los distintos servicios cursados en la celda, sino realizar una asignación eficiente de los recursos disponibles bajo ciertas restricciones, como por ejemplo, del mecanismo de coordinación de ICI.

En un principio, los recursos radio a asignar por la celda se limitaban a los RBs y la potencia de transmisión de cada usuario. La capacidad del algoritmo para elegir los mejores RBs para cada usuario determina la ganancia que el algoritmo puede extraer de la diversidad multiusuario. Por otro lado, la selección de la potencia de transmisión va encaminada normalmente a compensar las pérdidas introducidas por el canal y/o conseguir una elevada tasa de transmisión. Muchas de las propuestas que pueden encontrarse en la literatura para la asignación de subportadoras y potencia en redes OFDMA se

basan, como se ha comentado anteriormente, en un planteamiento matemático: la asignación de recursos se obtiene como solución a un problema de maximización o minimización convexa sujeta a un conjunto determinado de restricciones. Dichas soluciones permiten obtener una asignación de recursos óptima a expensas de un elevado coste computacional. En la literatura pueden encontrarse propuestas matemáticas encaminadas a maximizar la SINR mínima observada por los usuarios en el RB asignado bajo ciertas restricciones de potencia total transmitida y tasa servida a cada usuario [Chang y Kuo, 2004], minimización de las variaciones en los RBs asignados entre dos tramas consecutivas [Fodor y Koutsimanis, 2008] o minimización de los recursos frecuenciales ocupados para asignar una determinada tasa a cada usuario [Hosein, 2009]. No obstante, la mayor parte de las propuestas se centran en dos planteamientos. Por una parte están los planteamientos matemáticos orientados a minimizar la potencia total transmitida por la celda bajo determinadas restricciones de tasa servida a cada usuario [Wong y otros, 1999a]. Mediante la definición de una función ideal que relaciona la tasa alcanzable en el RB con la potencia requerida, se realiza la asignación de recursos que permite que la tasa lograda por los usuarios sea igual a sus requisitos y la potencia transmitida por la celda sea la menor posible. Sin embargo, el grueso de las propuestas matemáticas pretenden maximizar la tasa servida por la celda bajo ciertas restricciones de potencia máxima transmitida [Krongold y otros, 2000; Jang y Lee, 2003; Hassan y Assaad, 2010; Schwarz y otros, 2010]. La relación entre la tasa de datos y la potencia de transmisión sigue normalmente un curva teórica que relaciona la SNR medida en un canal con la tasa alcanzable, siendo la curva de Shannon la opción normalmente utilizada por tener una expresión sencilla [Zhang y otros, 2007]. Por norma general, este tipo de soluciones de maximización de tasa conducen a que los usuarios interiores reciban la mayor parte de los recursos radio, puesto que son capaces de obtener un mayor throughput con una potencia de transmisión dada. En un intento por ofrecer

mayor equitatividad en la asignación, en [Shen y otros, 2003] se añade una condición más en la asignación de modo que las tasas asignadas a los distintos usuarios deben cumplir una determinada proporción fijada a priori. De forma similar, en [Indumathi y otros, 2011] la equitatividad en las asignaciones se consigue por medio de la maximización de la tasa total ponderada de cada usuario, es decir, la tasa cursada por cada usuario se multiplica por un peso determinado y la suma de todas ellas es el valor a maximizar por el algoritmo. Estos esquemas suelen suponer que la tasa que puede ser cursada para cada usuario es infinitamente divisible. Sin embargo, en un sistema real la tasa cursada viene dada por alguna de las MCSs soportadas por el sistema. Además, con el fin de obtener una solución cerrada para el planteamiento matemático, en muchos casos es necesario relajar determinadas condiciones que hacen que dicha solución sea inviable en un sistema real. A modo de ejemplo, para que el problema de la asignación de recursos pueda ser resuelto, en [Stolyar y Viswanathan, 2009] y [Aggrawal y otros, 2011] se parte como premisa que cada subportadora puede ser asignada potencialmente a todos los usuarios de la celda, lo que a todas luces no es posible en un sistema real. Por tanto, tras obtener una solución por alguno de estos métodos, es necesario aplicar una discretización posterior que acaba alejando la solución del óptimo ofrecido por el algoritmo.

En resumen, los planteamientos matemáticos no son aplicables directamente para sistemas reales. Si bien son capaces de obtener un reparto óptimo de los recursos existentes, en muchos casos se basan en suposiciones no realistas y exigen un gran tiempo de computación para alcanzar la solución final. En este contexto aparecen los métodos heurísticos, que permiten obtener una solución cercana al óptimo pero con un tiempo de computación asumible. Los algoritmos heurísticos son extremadamente versátiles y flexibles, ya que pueden incorporar un gran número de restricciones a la asignación sin que su complejidad crezca enormemente. Pueden por tanto integrarse perfectamente con el mecanismo de

ICIC aplicado en el sistema, y de ahí que sea la solución más aceptada para la asignación de recursos radio en redes de banda ancha OFDMA.

En el caso de los algoritmos heurísticos, la asignación de la potencia de transmisión en cada RB sigue fundamentalmente dos tendencias: el esquema de *potencia constante* y la *inversión de canal*. El esquema más simple para la asignación de la potencia de transmisión es el método de potencia constante, ya que se basa en repartir la potencia total disponible en la celda de forma equitativa entre todos los RBs del sistema [Rhee y Cioffi, 2000]. Así, si llamamos P_T^{max} a la potencia máxima de transmisión de la celda y N_{RB} al número de RBs del sistema, la potencia asignada en cada RB se obtiene directamente como P_T^{max}/N_{RB} . Todo el peso de la adaptación del enlace recae entonces en la selección de subportadoras [Zhang y Wang, 2006] y/o la adaptación de la MCS [Li y Liu, 2003]. Sin embargo, este esquema penaliza a los usuarios del exterior de la celda puesto que normalmente son los que requerirán más potencia para recibir servicio. Además, limita enormemente la capacidad de asignación del algoritmo de scheduling, puesto que un usuario que exceda incluso por una mínima cantidad el valor preasignado de potencia en el RB, no podrá recibir servicio en él. Resulta por tanto más conveniente aplicar un método que tenga en cuenta el estado de canal para determinar la potencia requerida por el usuario en cada RB. De ahí surge el método denominado inversión de canal, que es la solución más extendida en la literatura para la asignación de potencia en redes móviles de nueva generación. Este esquema se basa en compensar las pérdidas introducidas por el canal de modo que la señal llegue al usuario con una determinada potencia [Haas y otros, 1997] o con un cierto nivel de SINR [Foschini y Miljanic, 1993; Taketsugu y otros, 2004]. Si se dispone de una buena estimación de canal, este esquema ofrece buenas prestaciones, ya que permite asegurar el nivel de calidad deseado en recepción para garantizar el uso de una determinada tasa de transmisión (un determinado esquema MCS). No obstante, una excesiva variabilidad en la asignación de

potencia, asociada a la aplicación de scheduling dinámico, conlleva implícitamente una mayor variabilidad en la interferencia, lo que finalmente introduce dificultades prácticas para estimar con bajo error las condiciones de canal e interferencia.

En cuanto a la asignación de recursos frecuenciales, la mayor parte de las propuestas que se pueden encontrar en la literatura se basan en el denominado *greedy assignment*: cada subportadora (o análogamente cada RB) se asigna a aquel usuario que mejores condiciones de canal observa en él [Wong y otros, 1999a; Pfletschinger, 2005]. Este esquema aplicado sin ningún tipo de restricción adicional, implica que los usuarios con mejor canal acaparan los recursos frecuenciales, siendo imposible garantizar cualquier tipo de prestaciones a los usuarios del exterior de la celda. Para ofrecer un cierto grado de equitatividad en las asignaciones de recursos frecuenciales, en [Shen y otros, 2005] se definen unos pesos para cada usuario de forma que el número de recursos frecuenciales finalmente asignados a cada usuario mantiene la proporción dada por sus respectivos pesos. Este esquema en concreto no permite priorizar adecuadamente las conexiones para satisfacer de forma clara los requisitos específicos de tráfico del usuario tales como la tasa promedio, puesto que al observar distintas condiciones de canal, es necesario aplicar diferentes MCSs y la tasa real servida a los usuarios puede cambiar de un RB a otro. En esta línea, algoritmos ampliamente conocidos como Proportional Fair (PF) [Jalali y otros, 2000; Holtzman, 2001], aplicable también como criterio de priorización temporal, busca asignar cada RB al usuario que maximiza la tasa de transmisión, pero añadiendo un criterio de ponderación inversamente proporcional a la cantidad de throughput ya recibido por ese usuario en una determinada ventana temporal. El objetivo último es un reparto equitativo a medio plazo de la capacidad del sistema.

Los algoritmos heurísticos más directos y sencillos, algunos de ellos ya presentados anteriormente, tratan de maximizar el beneficio en cada una de las asignaciones realizadas, es decir, cada RB se asigna al usuario con mejor canal o alternativamente, cada usuario recibe el RB en el que mejores condiciones de canal observa. Sin embargo, resulta más conveniente buscar una asignación que obtenga el mayor beneficio global para el sistema, en un planteamiento muy próximo al de las soluciones óptimas matemáticas. Por ejemplo, los usuarios del interior de la celda, que generalmente observan un mejor canal en toda la banda, no deberían ocupar los pocos RBs en los que los usuarios exteriores son capaces de recibir servicio con la suficiente calidad. Una solución clásica para este tipo de propuestas se basa en definir una matriz de costes, en la que la posición (k,i) representa el beneficio de asignar al usuario k en el RB i [Dasgupta y otros, 2008; Sun y otros, 2009]. La asignación global que maximiza el beneficio puede encontrarse por medio de un algoritmo iterativo bien conocido en la literatura que se denomina *Método Húngaro* [Kuhn y otros, 1955]. Sin embargo, este algoritmo lleva asociado un coste de computación muy elevado, puesto que necesita aplicar operaciones sobre matrices potencialmente muy grandes. Por tanto, esta idea de maximizar el beneficio global de la celda en vez de maximizar cada una de las asignaciones particulares, se traslada a algoritmos heurísticos más simplificados mediante una fase de reajuste de las asignaciones realizadas de modo que la solución obtenida se acerque más a la asignación óptima con un coste computacional asumible. Así, en [Hamouda y otros, 2006] se parte de una asignación por potencia constante donde cada RB se asigna al usuario que sin haber satisfecho su tasa requerida, mayor SINR observa en él. En caso de que algún RB no haya sido asignado, la potencia no utilizada se invierte en incrementar la potencia de transmisión de los usuarios situados en el exterior de la celda para mejorar su MCS. De este modo, resulta más probable que se puedan satisfacer los requisitos de tasa de dichos usuarios, que son los que peores condiciones observan. En [Heo y otros, 2007], sin embargo, el exceso de

potencia se obtiene cuando la potencia de transmisión se asigna por inversión de canal de modo que la SINR lograda por el usuario sea igual a la SINR mínima de la MCS objetivo. La diferencia entre la potencia total asignada y el máximo de la celda se reinvierte en incrementar la capacidad de la celda: el exceso de potencia se va repartiendo a los usuarios que menor incremento de potencia requieran para subir un nivel su MCS. Aunque la propuesta referida no lo contempla, sería preciso considerar el cumplimiento de QoS en el reparto de potencia de modo que la potencia disponible se invierta en los usuarios que menor satisfacción de QoS acumulan. Utilizando este mismo método para extraer el exceso de potencia, en [Baum y otros, 2003] se establecen y comparan varios criterios a la hora de repartir la potencia: por un lado, el exceso de potencia puede emplearse en aumentar el throughput global de la celda asignando más potencia a aquellos terminales que tengan un mayor ratio de incremento de throughput frente a incremento de potencia al pasar a una MCS un nivel superior. Otras opciones consisten en asignar el excedente de potencia de modo que se maximice el número de usuarios que utilizan la MCS máxima (mayor throughput) o invertirla para permitir la entrada de usuarios que en un principio fueron rechazados por no llegar a la SINR mínima de la menor MCS (mayor cobertura). Mediante simulaciones se determina que el método que mejores prestaciones ofrece consiste en primero intentar usuarios que fueron rechazados por no llegar a la MCS mínima y, con el sobrante, aumentar la capacidad global de la celda por el método de mínima ratio.

La fase de reajuste puede también afectar al reparto realizado en la etapa inicial de los recursos frecuenciales. En [Zhang y Wang, 2006] se comienza asignando cada RB al usuario que mejores condiciones de canal observa en él. Posteriormente, se calcula la satisfacción de tasa de cada usuario asignado como la diferencia entre la tasa servida y la realmente requerida. Se entra entonces en un proceso de reajuste en el que el usuario que excede en mayor medida su tasa requerida cede su RB menos eficiente al usuario con menor satisfacción de tasa

siempre y cuando el primero siga cumpliendo con sus requisitos de tasa. Una propuesta similar puede encontrarse en [Kivanc y otros, 2003], pero en este caso los recursos intercambiados son aquellos que provocan una menor disminución en la tasa global servida por la celda. El reajuste de las asignaciones frecuenciales también puede aplicarse para reducir la potencia de transmisión en la celda. Por ejemplo, en [Wong y otros, 1999b] se comienza asignando cada subportadora (o equivalentemente cada RB) al usuario que mejores condiciones de canal presenta en ella, siempre y cuando no haya satisfecho sus requisitos de tasa. A continuación se realizan intercambios de subportadoras entre usuarios siempre y cuando esto suponga una reducción en la potencia total transmitida y la tasa servida sea superior o igual a la tasa requerida por ellos.

A modo de conclusión, en la literatura pueden encontrarse un gran número de propuestas para la asignación dinámica de recursos radio en redes móviles de banda ancha, pero la mayor parte se basan en planteamientos matemáticos que en muchos casos aplican premisas ideales que no pueden ser aplicados en un sistema real. Los algoritmos heurísticos por su parte logran una asignación subóptima pero con una complejidad computacional asumible. Sin embargo, son pocos los ejemplos en los que los tres recursos fundamentales (RBs, potencia y tasa) se gestionan de forma simultánea para obtener unas mejores prestaciones. Por otro lado, la mayor parte de los algoritmos heurísticos se centran en buscar una asignación de recursos lo más eficiente posible desde el punto de vista de los recursos gestionados, sin tener en cuenta el grado de satisfacción de la QoS demandada por los usuarios. Por este motivo, la aproximación seguida en esta tesis pasa por definir algoritmos de asignación de recursos que gestionen simultáneamente los RBs, potencia y tasa bajo las restricciones impuestas por el mecanismo de coordinación de ICI y que se

integren perfectamente con la estrategia de scheduling temporal, de modo que sean capaces de proporcionar la QoS exigida por los usuarios a lo largo de toda la celda.

2.3.2 Propuestas para el Scheduling Temporal

Como ya se ha descrito anteriormente, la provisión de QoS a los usuarios pasa por la aplicación de criterios de priorización temporal, relacionados principalmente con la satisfacción de los requisitos de tasa y retardo, conjuntamente con las estrategias de selección adaptativa de RB, potencia y MCS dirigidas a maximizar la eficiencia en el uso de los recursos de la red. Debido a la complejidad que acarrea aplicar conjuntamente todos estos factores, uno de los planteamientos más comunes de entre los propuestos en la literatura divide el scheduling en dos fases a priori desacopladas: el scheduling en el dominio del tiempo (TD), encargada fundamentalmente de la gestión de la QoS, y el scheduling en el dominio frecuencial (FD), que reparte los recursos de la celda y de la que ya hemos hablado cumplidamente en la sección anterior.

El scheduling temporal determina un conjunto limitado o bien priorizado de usuarios candidatos a recibir una asignación de recursos en un TTI, considerando el tráfico almacenado en la buffers de todos los potenciales usuarios que demandan servicio. Dicha selección y ordenación se hace en base a una métrica que puede estar relacionada con las condiciones de canal, el throughput alcanzable por el usuario, el retardo que experimenta, el tamaño del buffer o ser simplemente una prioridad estática relacionada con la clase de servicio que soporta o el rol del usuario. En definitiva, el conjunto de políticas a aplicar es amplio, empezando por estrategias tan simples como el *Round Robin*, donde las conexiones reciben siempre el mismo número de oportunidades de transmisión independientemente de su estado, o bien con ligeras modificaciones para adaptarlas al canal radio. A modo de ejemplo, tomando

como base la estrategia *Weighted Fair Queueing* (WFQ) heredada de la red fija, en [Khawam y Kofman, 2006] se propone una versión modificada denominada *Opportunistic WFQ* (OWFQ), que contempla las condiciones promedio de canal que observan los usuarios a la hora de priorizarlos. Sin embargo, estas estrategias adaptadas al entorno radio, no se ajustan suficientemente a este medio tan cambiante, de tal forma que la garantía de cumplimiento de la QoS queda bastante limitada, y de ahí que surjan estrategias específicamente diseñadas para el entorno móvil. Por ejemplo, la estrategia *Maximum Rate*, también denominada *Maximum Throughput* [Wu y otros, 2005; Pokhariyal y otros, 2007], asigna más prioridad al usuario que observa mejor canal promedio o lo que es equivalente, que es capaz de obtener una mayor tasa instantánea promedio, en los RBs asignables en el TTI. Al elegir a los usuarios en orden decreciente de prioridad, aunque el throughput cursado por la celda será máximo, se obtiene un reparto muy injusto de los recursos puesto que los usuarios del exterior de la celda rara vez conseguirán una oportunidad de transmisión. En un intento por mitigar este hecho aparece la estrategia *Proportional Fair* (PF) [Jalali y otros, 2000 Holtzman, 2001], ya mencionada anteriormente. En este caso, la prioridad del UE k en el instante de scheduling n se calcula como en la expresión (2.2), donde $\hat{r}_k[n]$ es el throughput instantáneo que puede recibir el usuario en el intervalo de scheduling n y $T_k[n]$ es el throughput medio ofrecido al usuario en el pasado. Este último se calcula normalmente de forma recursiva utilizando la expresión (2.3), considerando un intervalo de filtrado de la estimación de longitud t_f TTIs. El throughput instantáneo $\hat{r}_k[n]$ se puede asociar con la tasa instantánea de transmisión, escogida del conjunto de MCS posibles en función de las condiciones de canal experimentadas por el UE, y se calcula normalmente considerando los RBs asignables en el TTI y asumiendo una distribución potencia uniforme entre ellos.

$$P_k^{PF} = \frac{\hat{r}_k[n]}{T_k[n]} \quad (2.2)$$

$$T_k[n] = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_f}\right) T_k[n-1] + \left(\frac{1}{t_f}\right) \hat{r}_k[n] & \text{si el UE } k \text{ recibe servicio en el TTI} \\ \left(1 - \frac{1}{t_f}\right) T_k[n-1] & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.3)$$

La estrategia PF sigue adoleciendo de limitar el acceso a los usuarios del exterior de la celda, puesto que estos requieren una mejora significativa en su canal como para poder obtener mayor prioridad que los usuarios interiores, de forma que acumulan bastante retraso en el acceso. Para corregir este efecto, en [Huang y Niu, 2007] se propone multiplicar el factor PF por un término que tiene en cuenta la tasa de llenado del buffer y el espacio disponible en el mismo. De este modo, a medida que los usuarios con peores condiciones de canal van acumulando paquetes, el término que considera el estado del buffer va ganando peso y se asignan más oportunidades a dichos usuarios. Sin embargo, este esquema se basa en tener una caracterización precisa de la estadística de llegada de paquetes para cada servicio, lo que no resulta sencillo cuando se habla de servicios multimedia en redes IP. Un método más simple de asignar más oportunidades a los usuarios más desfavorecidos es considerar como métrica de scheduling temporal únicamente el inverso de la tasa de datos servida al usuario [Pokhariyal y otros, 2007]. El objetivo último de esta disciplina es proporcionar a todos los usuarios el mismo throughput promedio independientemente de su localización. Sin embargo, esta estrategia no tiene en cuenta los diferentes requisitos de tasa de los usuarios y además resulta en una pérdida de throughput en el global de la celda puesto que se asignan un gran número de recursos a los usuarios del exterior para que alcancen valores de throughput comparables a los del interior.

Cuando se trata de servicios en tiempo real, la tasa servida a los usuarios no es el parámetro más determinante de QoS. En este caso, el retardo acumulado por los paquetes de datos resulta más significativo. Teniendo en cuenta esto, en

[Chiussi y Sivaraman, 1998] se propone la estrategia *Earliest Deadline First* (EDF), que asigna más prioridad al usuario con el paquete que se encuentra más cerca de ser descartado por exceder su cota de retardo. Del mismo modo, en [Kausar y otros, 2011] se añade un término que tiene en cuenta la tasa de descarte de paquetes, es decir, los paquetes que son descartados por exceder el retardo máximo admitido por el servicio. Así, cuando el descarte de paquetes para un servicio aumenta, su peso relativo frente al resto de servicios en tiempo real se incrementa, pudiendo de este modo recibir un mayor número de recursos para garantizar su QoS. En [Mohanram y Bhashyam, 2007], por el contrario, se asigna mayor prioridad a aquellos usuarios que acumulan un mayor número de paquetes en sus buffers. En todos estos métodos no se tiene en cuenta el estado del canal a la hora de fijar la prioridad de scheduling, lo que lleva a asignar siempre mayor prioridad a los usuarios del exterior de la celda, que son los que generalmente acumulan un mayor retraso. Por tanto, la equitatividad en la asignación de recursos puede verse afectada al igual que la eficiencia en la utilización de recursos, puesto que los usuarios exteriores necesitan modulaciones más robustas, con lo que la tasa total servida por la celda será muy baja. Será por tanto responsabilidad del scheduling frecuencial asegurar unas condiciones de canal suficientes como para que los usuarios exteriores no acaben monopolizando los recursos.

En las soluciones anteriores, el scheduling temporal proporciona la lista de usuarios a asignar ordenados por prioridad, que después el scheduler frecuencial utilizará para la asignación de los recursos radio. En este sentido, la función de scheduling temporal puede limitarse a elegir un conjunto cerrado de usuarios sobre los que aplicar la función de scheduling frecuencial, o alternativamente, pasar una lista completa priorizada de todos los usuarios con tráfico pendiente en sus buffers. En este último caso, el scheduler frecuencial asignaría recursos en orden decreciente de prioridad temporal. Para mejorar las prestaciones del sistema en cuanto a gestión de QoS, una mejora ya comentada

anteriormente consistiría en actualizar la prioridad temporal cada vez que se produce la preasignación de algún RB.

La estrategia de dividir el scheduling temporal y frecuencial en dos entidades separadas no es la única propuesta existente en la literatura. Pueden encontrarse también propuestas que fusionan completamente el scheduling temporal y frecuencial, de modo que cada RB es asignado al usuario que tiene mayor prioridad en él. Sin embargo, las propuestas presentadas son generalmente muy simplistas ya que resulta muy complejo diseñar algoritmos conjuntos que ofrezcan unas prestaciones adecuadas teniendo en cuenta el gran número de factores implicados en el scheduling. La solución más simple de scheduling frecuencial y temporal conjunto pasa por asignar cada RB al usuario que mayor tasa puede obtener en él, que es la propuesta conocida como *Best Channel* [Wong y otros, 1999a]. En [Beh y otros, 2008] se propone una variante de este método orientada esta vez al usuario, de modo que el usuario con una mejor tasa instantánea promedio en toda la banda recibe los RBs en los que observa mejor canal hasta que no tiene más datos a transmitir. Ambos casos, pero especialmente este último, provocan que los usuarios del interior de la celda monopolicen los recursos ya que su tasa instantánea será mayor que la de los usuarios exteriores. Como se ha explicado para el criterio temporal, para evitar que los usuarios del centro de la celda monopolicen por completo los recursos, se puede utilizar el esquema Proportional Fair [Yoon y otros, 2004; Lei y Lin, 2008; Kong y otros, 2009], de modo que cada RB es asignado al usuario que obtiene un mayor factor PF (como en la ecuación (2.2) pero la tasa instantánea se refiere ahora a cada RB, no al promedio de todos). Una propuesta similar puede encontrarse en [Pokhariyal y otros, 2007], donde cada RB es asignado al usuario que mayor tasa instantánea puede conseguir en él con respecto a la tasa promedio que puede lograr a lo largo de todo el ancho de banda. Aunque esta estrategia permite balancear más las oportunidades de asignación entre usuarios interiores y exteriores, no tiene en cuenta el servicio

prestado a los usuarios en subtramas anteriores, por lo que no permite garantizar la QoS ofrecida a los usuarios. La solución proporcionada en [Gueguen, c. y Baey, 2009], denominada *Weighted Fair Opportunistic* (WFO), combina las condiciones de canal observadas por el usuario con la provisión de QoS en servicios dependientes del retardo. Cada RB i es asignado al usuario k con una mayor métrica WFO, obtenida como se muestra en (2.4). El throughput instantáneo alcanzable por el usuario en el RB (\hat{r}_k) se multiplica por un factor WF_k que es función de la probabilidad deseada de *outage*, es decir, de paquetes que exceden una cierta cota de retador de la conexión k (PDOR: *Packet Delay Outage Ratio*). Un ejemplo típico de esta función se muestra en la ecuación (2.5), donde α y β son dos parámetros que se calibran dependiendo de la justicia que pretenda establecerse entre las distintas conexiones. En concreto, α controla las fluctuaciones de PDOR y β es un parámetro de normalización que asegura que WF_k y \hat{r}_k están en el mismo orden de magnitud. Si β toma un valor bajo ocasionará que el parámetro WF no tenga influencia y la justicia decrezca, mientras que en el caso en que tenga un valor elevado aumentará la justicia a costa de no maximizar el throughput.

$$P_k^{WFO} = \hat{r}_k \cdot WF_k \quad (2.4)$$

$$WF_k = f(PDOR_k) \quad \text{con} \quad f(x) = 1 + \beta x^\alpha \quad (2.5)$$

Las estrategias anteriores son válidas generalmente para un único tipo de servicio, pero plantean limitaciones cuando consideran conjuntamente servicios en tiempo real y best effort. Por ejemplo, la estrategia WFO en un escenario multimedia, no permitiría priorizar adecuadamente servicios en tiempo real y servicios sin limitaciones de retardo. Para este tipo de escenarios mixtos se proponen las soluciones basadas en funciones de urgencia y eficiencia (UEPS: *Urgency and Efficiency Based Packet Scheduling*) que determinan cómo de necesario es para el sistema la transmisión de un determinado paquete.

Lógicamente, los paquetes con límites de retardo son más urgentes a medida que nos acercamos a su cota máxima, mientras que los servicios sin limitaciones de retardo presentan una urgencia plana en el tiempo. El objetivo último de las funciones de urgencia es maximizar el throughput de las distintas conexiones con tráfico sin restricciones temporales al tiempo que se cumple con los requisitos de calidad QoS de los UEs con servicios en tiempo real. La clave de estos sistemas está por tanto en el diseño de la función de urgencia y eficiencia. En [Ryu y otros, 2005a], por ejemplo, la prioridad de una conexión se calcula como se muestra en la ecuación (2.6), donde la función de urgencia $U(t)$ es una función monótona decreciente con el tiempo y la eficiencia en la utilización de los recursos se obtiene por medio de un factor PF. En esta propuesta se utiliza la derivada de la función de urgencia para dar más peso a los instantes en los que la urgencia del paquete varía drásticamente. La componente de PF se puede calcular para el promedio del ancho de banda, tal y como se propone en el artículo señalado, o bien independientemente para cada RB. En el primer caso, los RBs serían asignados de forma ordenada al usuario con métrica mayor, lo que supone que las condiciones reales observadas en el RB asignado no se tienen en cuenta. Por tanto, la segunda opción parece más adecuada, asignándose cada RB a la conexión con mayor métrica en él.

$$P^{UEPS} = |U'(t)| \frac{\hat{r}_k[n]}{T_k[n]} \quad (2.6)$$

Las funciones de urgencia son funciones de utilidad que normalmente toman valores entre 0 y 1, siendo el valor 0 el momento de máxima urgencia. Por tanto, estas funciones son decrecientes y pueden clasificarse en dos tipos dependiendo del tratamiento que hagan de los paquetes al exceder el tiempo máximo de validez del mismo o *deadline*: en las funciones *hard deadline* (Figura 2.29a), el paquete es eliminado del buffer de transmisión una vez se ha excedido su cota máxima, mientras que en las funciones *soft deadline* (Figura 2.29b), la cota de

retardo representa un valor deseado más que un límite, con lo que los paquetes pueden seguir siendo transmitidos aun cuando exceden el deadline.

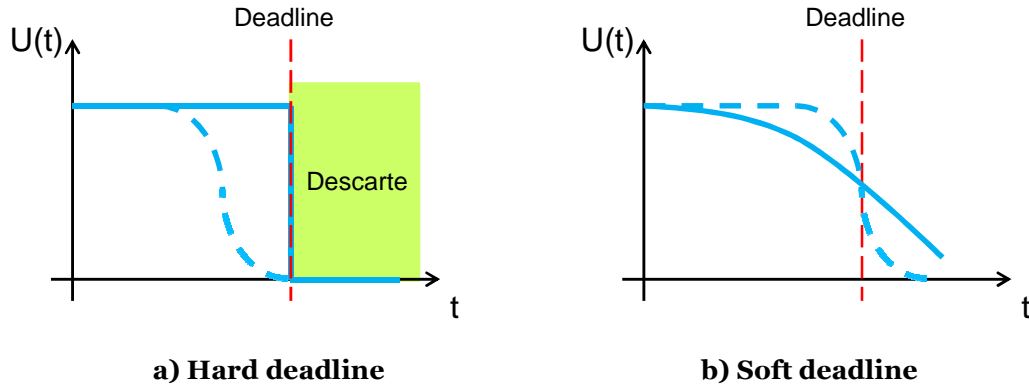


Figura 2.29: Funciones de urgencia hard y soft deadline

Para capturar de forma clara la urgencia de los paquetes para los distintos servicios, se definen distintas funciones de utilidad para tráficos de tiempo real (RT: *Real Time*) y tráficos de no tiempo real (nRT: *non-Real Time*). En el caso de los servicios RT, en los que existe un plazo temporal claro que los paquetes no pueden exceder, lo corriente es aplicar funciones de utilidad de tipo hard, mientras que en los servicios nRT se pueden aplicar funciones soft en las que la función de urgencia decrece lentamente (aumenta su urgencia) conforme el retardo aumenta. En [Ryu y otros, 2005b], los autores proponen las dos funciones de urgencia que se muestran la ecuación (2.7), dependiendo de si se trata de un servicio RT o nRT. Los parámetros a y c definen la pendiente y el punto de inflexión de la función de urgencia (calculadas en función de la cota de retardo del servicio RT) y d_{max} representa el valor de retardo deseado para el servicio nRT.

$$U(t) = \begin{cases} e^{-a(t-c)} / (1 + e^{-a(t-c)}) & \text{para servicios RT} \\ 1 - e^{at} / e^{d_{max}} & \text{para servicios nRT} \end{cases} \quad (2.7)$$

Siguiendo este planteamiento, en [Chen y otros, 2008] se proponen funciones de urgencia adaptativas para los servicios RT, de modo que cuando

hay pocos datos pendientes de transmitir de los servicios nRT, se ajustan los valores a y c para mover el punto de inflexión de la curva a valores de retardo más bajos (Figura 2.30). Los tráficos RT consiguen de este modo una mayor prioridad y reducen su retardo.

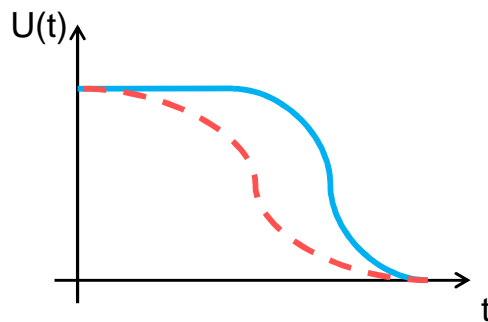


Figura 2.30: Ejemplo de función de urgencia adaptativa

Las propuestas anteriores suponen una integración simple del scheduling frecuencial y temporal: los RBs son recorridos secuencialmente buscando el usuario que mayor prioridad tenga en él. Cabe destacar que en este caso, en cuanto a la política de scheduling temporal, de facto nos encontramos con dos posibles papeles. Por un lado, la estrategia de scheduling temporal se puede utilizar para acotar el número de UEs sobre el que aplicar posteriormente el scheduling frecuencial. En este caso, las políticas de scheduling temporal y frecuencial pueden ser totalmente diferentes (prevaleciendo la segunda una vez acotado el subconjunto de usuarios). O bien, el conjunto de UEs que reciben asignaciones de scheduling no está limitado, pero la política de scheduling temporal y frecuencial no es separable, respondiendo a los criterios más elaborados que se acaban de enunciar.

Alternativamente, se puede recorrer secuencialmente la lista priorizada de usuarios y asignarles los RBs en los que tengan mayor prioridad aplicando el criterio de la política de scheduling frecuencial. En este caso, ambas políticas temporal y frecuencial son independientes, y la última iría dirigida más a maximizar el uso de los recursos del sistema. En cualquier caso, el orden en el

que se recorren los RBs o la lista de usuarios tiene gran impacto en la asignación finalmente realizada. Es esperable por tanto que se puedan obtener unos mejores resultados cuando el par usuario-RB se elige simultáneamente. El proceso sería el siguiente: calcular para cada usuario k y RB i su valor de prioridad de asignación. Tomar entonces el par usuario-RB $\{k, i\}$ con mayor prioridad, lo que significa asignar el RB i al usuario k , actualizar la prioridad de todos los pares usuario-RB y buscar el siguiente par con mayor prioridad. El proceso finaliza cuando todos los usuarios han satisfecho sus requisitos de tasa o cuando todos los RBs han sido asignados. Cualquiera de las métricas anteriormente descritas puede utilizarse para este tipo de solución, aunque en la literatura pueden encontrarse otras propuestas más elaboradas al efecto. Por ejemplo, la estrategia *Class and Channel Condition Weighted Proportionally Fair Scheduler* (C³WPF) [Ramachandran y otros, 2008] supone una generalización de las métricas basadas en condiciones instantáneas de canal. El valor de prioridad para cada par usuario-RB $\{k, i\}$ se calcula de acuerdo con la ecuación (2.8), donde $T_k[n]$ es el throughput medio recibido por el UE k hasta el momento, $C_{k,i}$ representa las condiciones de canal instantáneas del UE k en el RB i y γ es una variable que controla el peso dado a las condiciones de canal. En el caso de que $\gamma = 1$, el método es equivalente a PF. Por el contrario, cuando el valor $\gamma = \infty$, cada RB se asigna al usuario con unas mejores condiciones de canal en él. La misma propuesta puede encontrarse en [Nonchev y otros, 2011] bajo el nombre de *Modified Multistream Proportional Fair* (MMPF).

$$F(k, i) = \frac{C_{k,i}^\gamma}{T_k[n]} \quad (2.8)$$

Con el fin de incorporar la satisfacción de QoS en la fórmula de cálculo de la prioridad, en [Andrews y otros, 2001, Gowda y otros, 2007] se propone utilizar la estrategia *Modified Largest Weighted Delay First* (MLWDF), que es una de las estrategias más populares para servicios en tiempo real. Esta estrategia

combina en una simple fórmula el estado del canal junto con el retardo acumulado por los paquetes, de modo que se intenta obtener un compromiso entre eficiencia en la utilización de los recursos radio y satisfacción de QoS. Así, se tomará el par usuario-RB $\{k, i\}$ que maximice el factor F de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$F(k, i) = a_k W_k[n] \frac{\hat{r}_{k,i}[n]}{\bar{r}_k[n]} \quad (2.9)$$

donde

$$a_k = -\frac{\log(\delta_k)}{W_k^{\max}} \quad (2.10)$$

siendo $W_k[n]$ el retardo del paquete más retrasado del usuario k , $\hat{r}_{k,i}[n]$ la tasa instantánea que puede lograr el usuario k en el RB i , $\bar{r}_k[n]$ la tasa promedio que puede obtener el usuario k en todo el ancho de banda del sistema y δ_k la probabilidad con la que se desea alcanzar los requerimientos de retardo, es decir, el ratio de paquetes cuyo retardo total es inferior a una cota máxima W_k^{\max} .

En un intento por potenciar aún más la satisfacción de QoS en el cálculo de la prioridad de asignación, surge la estrategia Exponential Rule (EXP) [Rhee y otros, 2004; Basukala y otros, 2009], que puede verse como un MLWDF al que se le ha añadido un término de promediado exponencial que da más peso a aquellas conexiones con un mayor número de paquetes con un retardo elevado. La fórmula de cálculo de la prioridad de cada par $\{k, i\}$ es como sigue:

$$F(k, i) = a_k W_k[n] \frac{\hat{r}_{k,i}[n]}{\bar{r}_k[n]} \exp\left(\frac{a_k W_k[n] - \overline{aW}}{1 + \sqrt{\overline{aW}}}\right) \quad \text{con} \quad \overline{aW} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M a_k W_k[n] \quad (2.11)$$

[Ofuji y otros, 2003] propone una estrategia simple de scheduling que considera de forma conjunta para calcular la prioridad de asignación los requisitos de retardo del servicio, el tipo de paquete (si es una retransmisión o no) y las condiciones de canal hacia el usuario. Para ello se utiliza la fórmula

(2.12), donde la prioridad de una conexión k en un RB i se calcula mediante la ponderación de tres factores:

$$F(k, i) = \alpha_{delay} P_{delay}(k) + \alpha_{type} P_{type}(k) + \alpha_{SINR} P_{SINR}(k, i) \quad (2.12)$$

donde:

- $\alpha_{delay}, \alpha_{type}, \alpha_{SINR}$ son los pesos de ponderación de cada uno de los factores.
- $P_{delay}(k)$ es el índice de prioridad de la conexión k en función de sus requerimientos de retardo. En el citado trabajo se hace uso de una función de escalón que da prioridad a un paquete cuando excede un retardo superior a una cierta cota (W_{pri}), antes de alcanzar la cota máxima (W_{max}) y ser descartado.

$$P_{Delay}(k) = \begin{cases} 0 & W_k[n] < W_{pri} \\ 1 & W_{pri} \leq W_k[n] < W_{max} \end{cases} \quad (2.13)$$

- $P_{type}(k)$ es el índice de prioridad de la conexión k en función del tipo de paquete que ocupa el primer lugar en la cola de salida (HoL: *Head of Line*). Fijando este valor a 1 solo cuando se trata de un paquete retransmitido, se consigue reducir el retardo en el servicio debido a las retransmisiones.
- $P_{SINR}(k, i)$ es el índice de prioridad de la conexión j en el RB i , en función de las condiciones de canal observadas por el usuario en cuestión. Dicho índice se expresa en función del valor instantáneo y promedio de SINR en recepción, $SINR_{inst}(k, i)$ y $SINR_{avg}(k, i)$ respectivamente. El término G_n es un factor de normalización para establecer los valores máximo y mínimo de $P_{SINR}(k, i)$. El término $SINR_w$ determina el umbral de SINR a partir del cual los UEs reciben una prioridad más elevada. Valores bajos de $SINR_w$ maximizan el throughput, ya que la prioridad depende de la SINR instantánea en el RB. Por el contrario, valores altos de $SINR_w$ favorecen los

repartos más equitativos, ya que el peso del valor promedio de SINR es mayor en la priorización.

$$P_{SINR}(k, i) = \begin{cases} G_n SINR_{inst}(k, i) & SINR_{avg}(k, i) > SINR_w \\ G_n \frac{SINR_{inst}(k, i)}{SINR_{avg}(k, i)} SINR_w & SINR_{avg}(k, i) \leq SINR_w \end{cases} \quad (2.14)$$

Todos los métodos anteriores proporcionan de forma rápida una solución subóptima en el problema de la asignación de recursos: cada vez que se asigna un recurso, el algoritmo de scheduling busca el mejor usuario de entre las opciones posibles de acuerdo con la estrategia de scheduling considerada. Tal y como se ha mencionado con anterioridad, esta aproximación no ofrece generalmente la mejor solución global de entre todas las posibles. Por ejemplo, si un usuario puede recibir una asignación en muchos RBs por tener buenas condiciones de canal pero otro solo puede ser asignado en unos pocos, las estrategias anteriores pueden llevar a que el primer usuario ocupe los pocos recursos viables para el segundo. Por tanto, en el diseño de los algoritmos heurísticos de asignación dinámica de recursos radio que se presentarán en los siguientes capítulos se ha considerado como premisa que el algoritmo sea capaz de alcanzar una solución subóptima para la asignación de recursos de forma global en la celda bajo las restricciones introducidas por el mecanismo de control de ICI subyacente. Para ello, se plantearán algoritmos que integran el scheduling frecuencial y temporal de modo que la prioridad de asignación de cada usuario se actualiza dinámicamente con las asignaciones realizadas y de este modo lograr una asignación de recursos más equitativa y eficiente en el sentido de provisión de QoS a los usuarios.

Capítulo 3

Propuesta Preliminar de Mecanismos de ICIC y Asignación Dinámica de Subportadoras y Potencia

Los mecanismos de coordinación de ICI son indispensables a la hora de garantizar una calidad suficiente en la señal recibida por los terminales móviles situados en el límite de la celda. Puesto que en los nuevos sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha se plantean un reuso unidad a nivel de celda para aprovechar al máximo el ancho de banda disponible, el control de la ICI es una herramienta imprescindible que permite mejorar las condiciones observadas por los usuarios situados en el extremo de la celda, ofreciendo así un servicio más equitativo para todos los usuarios del sistema.

Desde un punto de vista de gestión de recursos radio, la coordinación de interferencias no puede aislarse completamente del posterior mecanismo de asignación de recursos radio (subportadoras, potencia y MCS). Como se ha comentado anteriormente, existe una gran interrelación entre ellos: las restricciones impuestas por el mecanismo de ICIC limitan los recursos asignables a cada usuario. Por esto, deben ser consideradas a la hora de diseñar

el algoritmo de asignación de recursos subyacente, de modo que se obtenga un aprovechamiento máximo del espectro. A modo de ejemplo, en el caso de un esquema FFR, los RBs asignables a los usuarios exteriores de celdas contiguas son ortogonales, alejando así la fuente interferente. Por tanto, el algoritmo concreto de asignación de recursos deberá intentar en la medida de lo posible que los usuarios del interior de la celda no sean asignados en estos RBs o de lo contrario se limitará enormemente el acceso de los usuarios exteriores por falta de recursos.

Sin embargo, a pesar de esta íntima relación entre el mecanismo de ICIC y los algoritmos de asignación de recursos de recursos, en este capítulo se presenta una evaluación preliminar por separado de cada uno de ellos, con el fin de poder realizar un análisis más profundo de estos. En primer lugar, se llevará a cabo una evaluación inicial en términos de calidad de señal recibida para distintos mecanismos de ICIC en el enlace descendente (apartado 3.1). Se van a comparar diferentes esquemas basados en sectorización con un esquema de reuso fraccional analizando la SINR media medida en distintas posiciones en la celda considerando condiciones de saturación, esto es, todos los recursos radio son asignados en cada TTI. De este modo se obtiene una estimación de la calidad mínima que en media puede ofrecer el sistema en condiciones de congestión. Cuando la carga del sistema sea inferior, la calidad de señal promedio recibida por los usuarios mejorará puesto que el nivel de interferencia será menor.

Cabe señalar en este punto que la calidad de la señal recibida, medida generalmente en términos de SINR promedio en recepción, no es el único factor a tener en cuenta a la hora de evaluar las prestaciones ofrecidas por el mecanismo de coordinación de interferencias. Hay que considerar también las restricciones que este mecanismo impone en el reparto de recursos radio entre los usuarios con tráfico activo: un mecanismo que proporcione una calidad de

señal excelente a costa de imponer un gran número de restricciones al acceso de los usuarios, no resulta a la larga beneficioso para el sistema, puesto que un elevado número de usuarios no llegarán a ser asignados debido a dichas restricciones. Es por tanto necesario encontrar un equilibrio entre la calidad de señal ofrecida y la accesibilidad a los recursos, que marcará la capacidad del algoritmo para gestionar con eficacia los recursos radio disponibles en el sistema.

Con esta intención, una vez estudiados los mecanismos de coordinación de interferencias en términos de cobertura, se propondrán una serie de algoritmos de asignación de recursos para los mecanismos de ICIC más interesantes. Estos algoritmos, que contemplan únicamente la asignación de RBs y potencia, no serían de aplicación directa en un escenario realista, puesto que no tienen en cuenta la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios. Sin embargo, nos permitirán realizar una evaluación preliminar de distintos aspectos que afectan a la tarea de scheduling y que nos será de utilidad para el diseño de algoritmos más complejos y robustos en capítulos posteriores. En este sentido, los algoritmos propuestos en este capítulo van a ser evaluados primero en unas condiciones ideales para extraer unas primeras conclusiones que serán después confirmadas y ampliadas cuando se considere un modelo del sistema más completo.

De todas las posibles opciones analizadas en el capítulo 2 sobre este aspecto, en esta tesis nos hemos centrado en el diseño de algoritmos heurísticos para la asignación de recursos puesto que, aunque no obtienen la solución “óptima”, permiten tener en cuenta una gran cantidad de restricciones y condicionantes que no pueden ser asumidos por los algoritmos matemáticos. Además, dado que la tendencia de los sistemas actuales pasa por una arquitectura plana que concentre la gestión de los recursos radio en la propia BS, los algoritmos presentados asumen que cada celda es independiente en cuanto a la asignación

de recursos, por lo que no es necesaria la comunicación con otras BSs o elementos de la red.

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

En este primer apartado se presenta una comparativa preliminar de distintos esquemas de coordinación de interferencias desde un punto de vista de valores promedio y desviación típica de la SINR en recepción para diferentes posiciones a lo largo de la celda. El objetivo es estimar la calidad de señal que pueden ofrecer los mecanismos de coordinación seleccionados para posteriormente elegir los que ofrezcan unas prestaciones más interesantes y desarrollar algoritmos concretos de asignación de recursos adaptados a ellos.

En primer lugar se va a presentar el modelo general del sistema que definirá los aspectos más importantes de la estructura de la capa radio, sobre los que se apoyará la posterior descripción de un conjunto mecanismos de coordinación de ICI para redes OFDMA.

3.1.1 Modelo Básico del Sistema

A lo largo de esta tesis se va a considerar exclusivamente una comunicación con duplexado en frecuencia (FDD: *Frequency Division Duplex*) del enlace ascendente y descendente. En comparación con el duplexado temporal (TDD: *Time Division Duplex*), el modo FDD ofrece una gestión más simple de los recursos radio al tiempo que reduce los requerimientos de sincronización entre celdas. Por otra parte, dado que esta tesis se centra en la gestión de la interferencia y en la asignación de recursos para el enlace descendente, puede asumirse que las BSs actúan como fuentes generadoras de tráfico y transmisores de señal, mientras que los usuarios móviles se limitan a recibir dicha señal,

demodular los datos recibidos y obtener las correspondientes estadísticas de tráfico y calidad del enlace.

El modelo de despliegue de red considerado en adelante se basa en un clúster compuesto de $N_{BS}=19$ celdas con geometría hexagonal. La BS se sitúa en el centro de la celda, que tienen un radio de $R_{cell}=1\text{km}$, lo que a su vez fija una distancia entre BSs $R_{ISD}=1732\text{m}$. Cada celda está compuesta por $N_{sec}=3$ sectores, cada uno de los cuales cubre un ángulo de 120° y da servicio a los UEs que se encuentran dentro de su área de cobertura. Cada sector dispone de una antena tipo panel cuyo patrón de radiación se da en la ecuación (3.1) y se representa gráficamente en la Figura 3.1.

$$D(\theta) = -1 \cdot \min \left\{ 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, 20 \right\} \quad \text{con} \quad \theta_{3dB} = 70^\circ \quad (3.1)$$

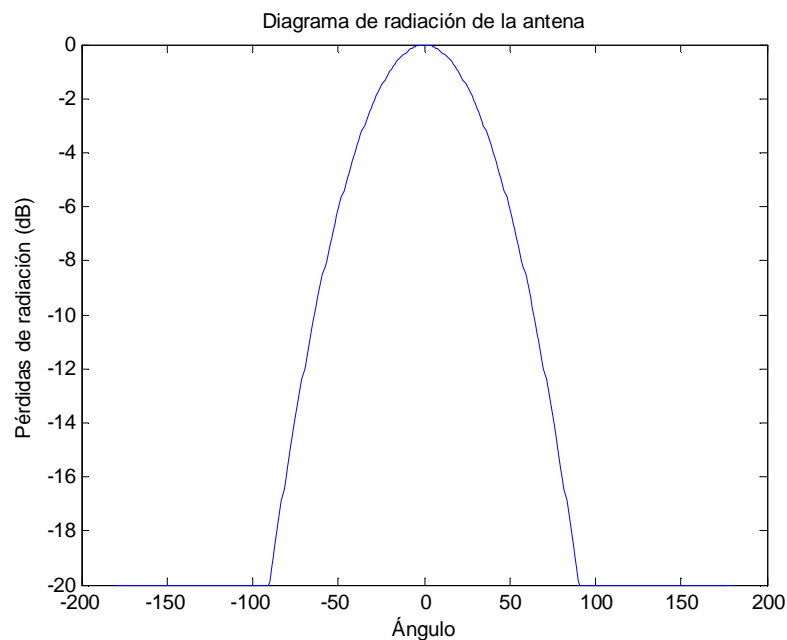


Figura 3.1: Patrón de radiación de la antena panel

Las dos configuraciones más comunes para la orientación de los sectores se encuentran en la Figura 3.2. El esquema a), que evita la alineación de la dirección de máxima radiación entre sectores colindantes, provoca sin embargo

la aparición de una zona de interferencia extremadamente alta en las intersecciones entre tres sectores (zona marcada con un círculo en la figura). La antena de los dos sectores más próximos de celdas vecinas se encuentra directamente orientada hacia esa zona, con lo que en caso de aplicar esquemas sin sectorización estática, la SINR observada caerá por debajo de 0dB. Este problema puede evitarse orientando el azimut de los sectores como se muestra en el esquema b) de la Figura 3.2, de modo que no coincida la orientación de las direcciones de máxima radiación entre sectores de celdas vecinas. En adelante consideraremos únicamente este último esquema por ofrecer unas mejores prestaciones globales sin incrementar la complejidad del scheduler.

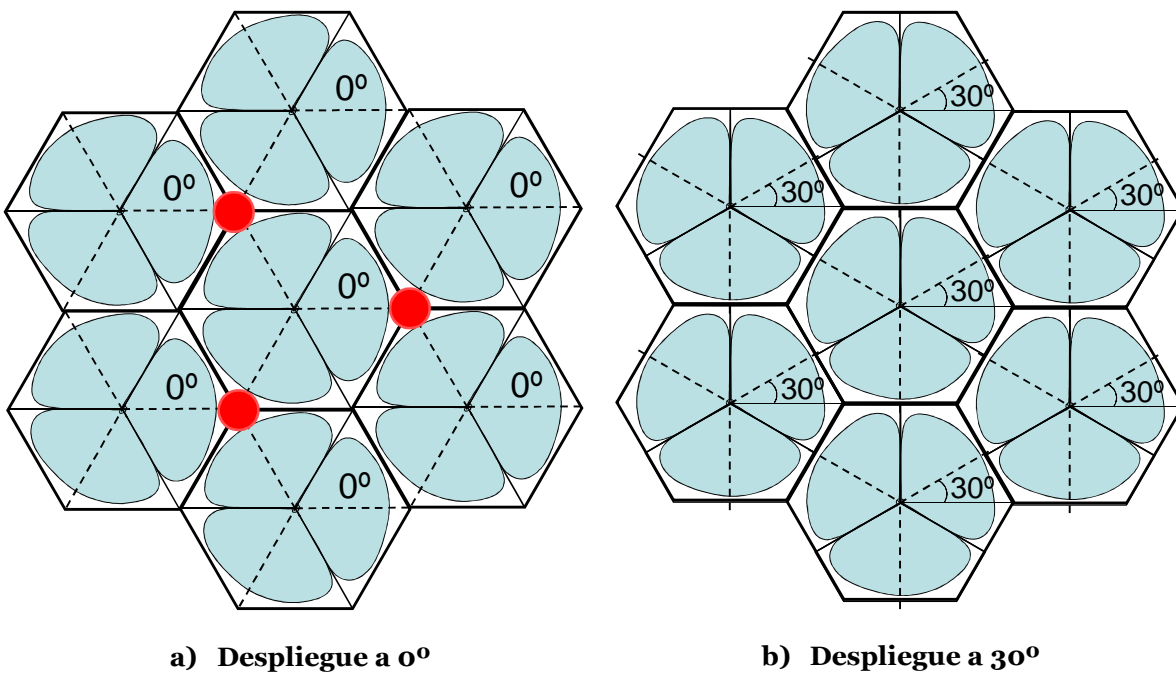


Figura 3.2: Configuraciones más comunes para el despliegue de sectores

Para el entramado de la comunicación se ha asumido la estructura utilizada en el estándar LTE para el esquema FDD [TS36.211, 2009], puesto que es la opción de duplexado preferida para el despliegue de sistemas LTE: la comunicación en el enlace descendente se organiza en base a subtramas de duración $T_{sf}=1\text{ms}$. En cada subtrama se realiza una nueva asignación de los

recursos radio existentes en dicha subtrama, con lo que una subtrama se corresponde con el periodo de scheduling (TTI). Las subportadoras contenidas en una subtrama pueden transmitir tres tipos principales de canales: canales de control (señalización hacia el usuario para gestionar las comunicaciones del downlink y del uplink), señales piloto (subportadoras que transportan símbolos conocidos por el receptor para poder estimar el canal) y el canal de datos (datos y señalización de alto nivel). La Figura 3.3 muestra el mapeado utilizado en downlink para los distintos canales, que se corresponde con la utilizada en LTE para la configuración por defecto (2 antenas transmisoras y prefijo cíclico CP de duración normal). El canal de datos se divide en RBs, que como se ha comentado en el capítulo anterior, es la unidad mínima de asignación. La misma potencia de transmisión y MCS se aplica a todas las subportadoras de un RB, de acuerdo con las decisiones de scheduling realizadas en cada subtrama. Un RB comprende por tanto N_{sc} subportadoras OFDM, separadas f_{sc} Hz, durante N_T símbolos OFDM consecutivos.

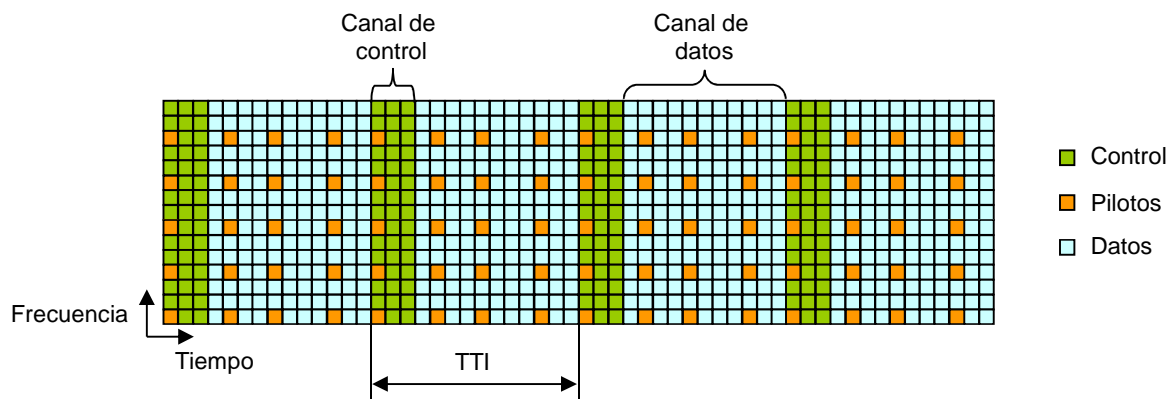


Figura 3.3: Entramado de la comunicación en el downlink

3.1.2 Mecanismos de Coordinación de ICI

En este apartado se evalúan desde un punto de vista de cobertura, una serie de mecanismos coordinación de ICI basados en los esquemas más comunes que se encuentran en la literatura y que ya fueron descritos en el capítulo 2: reuso

fraccional y sectorización. Como se ha comentado, esta comparativa se ha efectuado en condiciones de saturación, es decir, cuando todos los recursos del sistema se asignan en cada subtrama, y tiene como objetivo realizar un primer análisis de distintos esquemas de coordinación de interferencias para determinar aquellos que potencialmente puedan ofrecer una mejor gestión de ICI. La comparativa enfatiza el análisis de las diferencias observadas al aplicar distintos esquemas de coordinación de potencia en conjunción con los esquemas de coordinación frecuencial. Asimismo, se evaluarán las ventajas potenciales de aplicar sectorización frecuencial frente a mecanismos de sectorización basada en códigos ortogonales.

Así, en todos los mecanismos analizados se considerará el uso de una máscara de potencia, que determinan la potencia transmitida en cada RB en función de la partición/subbanda frecuencial a la que pertenecen. Los valores de la máscara de potencia se calculan de modo que el límite de potencia máxima transmitida por la celda (P_T^{max}) nunca se sobrepasarse, aun cuando se asignen todos los RBs del sistema. A su vez, esta máscara puede tener varios niveles (distintos valores de potencia de transmisión) para crear subbandas con diferentes características a la hora de asignar usuarios. La potencia transmitida en cada RB viene determinada por tanto por el nivel de la máscara al que este pertenece.

Asumiendo una máscara de L niveles, cada uno con $N_{RB,l}$ RBs y un salto Δ_l dB entre el nivel l y $l-1$, las ecuaciones genéricas para determinar los valores de potencia transmitida en los RBs de cada nivel (M_{med}^l) son las siguientes:

$$M_{med}^l (dBm) = M_{med}^{l-1} (dBm) + \Delta_l (dB) \quad l = 1, \dots, L-1 \quad (3.2)$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} N_{RB,l} 10^{\frac{M_{med}^l (dBm)}{10}} = P_T^{max} \quad (3.3)$$

A continuación se detallan los mecanismos de control de ICI considerados en la comparación por cobertura. En esencia, se van a comparar esquemas basados en sectorización y reuso fraccional. Se mostrarán también a modo de referencia las prestaciones obtenidas cuando no se considera ningún tipo de coordinación, es decir, los RBs se asignan libremente en todas las celdas.

3.1.2.1 Mecanismo basado en FFR

Con el fin de analizar las prestaciones ofrecidas por un esquema reuso fraccional, en esta comparativa se incluye un esquema soft-FFR clásico como fue descrito en el capítulo 2, aplicado sobre las celdas sectorizadas. Como se muestra en la Figura 3.4, un tercio de los recursos frecuenciales de cada celda se destinan a la subbanda exterior, que se transmite con mayor potencia para alcanzar el extremo de la celda y se mapea en recursos frecuenciales distintos en celdas vecinas para reducir las interferencias. De este modo, la interferencia en la subbanda exterior proviene únicamente de los usuarios interiores de otras celdas, que utilizarán una potencia de transmisión inferior. Sin embargo, al no imponer restricciones adicionales en cuanto al acceso a dicha subbanda, cada RB puede asignarse a un usuario interior cualquiera, sin importar el sector al que pertenece. La interferencia puede por tanto provenir de cualquier sector de las celdas vecinas, lo que supone un incremento en la variabilidad de la ICI.

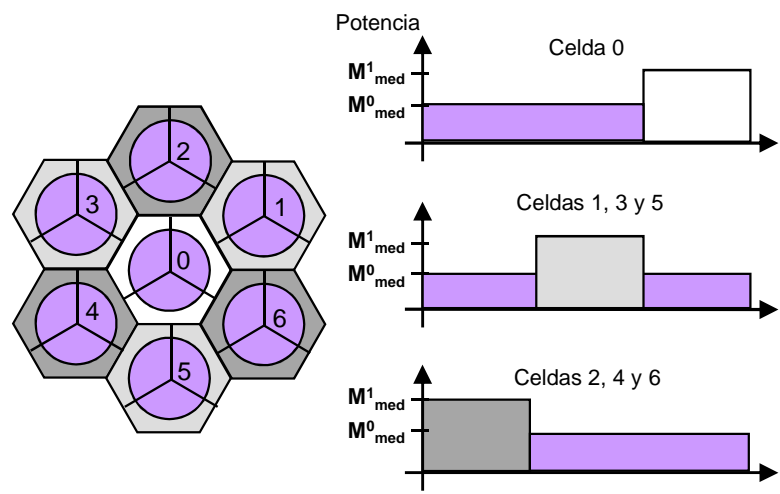


Figura 3.4: Esquema de coordinación FFR clásico

Puesto que en el esquema FFR solo se definen 2 subbandas (subbanda interior y subbanda exterior), la máscara de potencia considerada en este esquema constará de $L=2$ niveles con $N_{RB,0}=2 \cdot N_{RB}/3$ y $N_{RB,1}=N_{RB}/3$.

3.1.2.2 Mecanismos basados en sectorización frecuencial

Como ya se ha detallado en el capítulo 2, la sectorización frecuencial se basa en dividir el ancho de banda del sistema en 3 subbandas y asignar cada una de ellas a un sector distinto de la celda. Adicionalmente se pueden aplicar restricciones en la asignación de recursos dentro de la sección del espectro asignada a cada sector, lo que genera esquemas de sectorización más complejos como los que se describirán más adelante.

En la comparativa en términos de cobertura se han considerado los tres esquemas siguientes:

Sectorización frecuencial clásica: este esquema (Figura 3.5) asigna una subbanda distinta del espectro a cada sector de la celda. Al no aplicar ninguna restricción adicional, la máscara de potencia tiene un único nivel ($L=1$, $N_{RB,0}=N_{RB}$) y la misma potencia de transmisión se utiliza en todos los RBs del sistema.

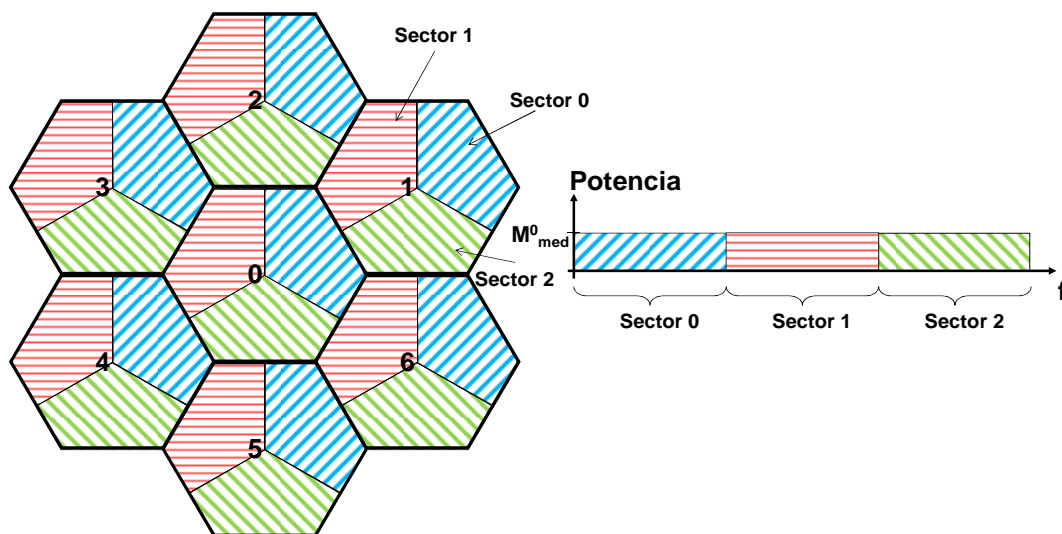


Figura 3.5: Esquema de sectorización frecuencial clásica

Sectorización frecuencial con máscaras a nivel de sector: este esquema (Figura 3.6) se basa en la propuesta de [R1-050833, 2005]: el área de cobertura de la celda se divide en 3 zonas concéntricas de igual área, cada una de las cuales es servida por una porción distinta de la subbanda asignada a cada sector. El dibujo de la Figura 3.6 es una representación simplificada de la distribución espacial que no tiene en cuenta el tamaño real de las áreas donde se aplican las distintas máscaras de potencia. La porción destinada a los usuarios interiores tiene una potencia de transmisión baja, mientras que para dar servicio a los usuarios exteriores se utiliza una porción con mayor potencia. Esto significa que en la subbanda de cada sector se aplica una máscara de potencia de $L=3$ niveles. En esencia, este esquema agrupa a usuarios con similares condiciones de canal en el mismo subconjunto de RBs.

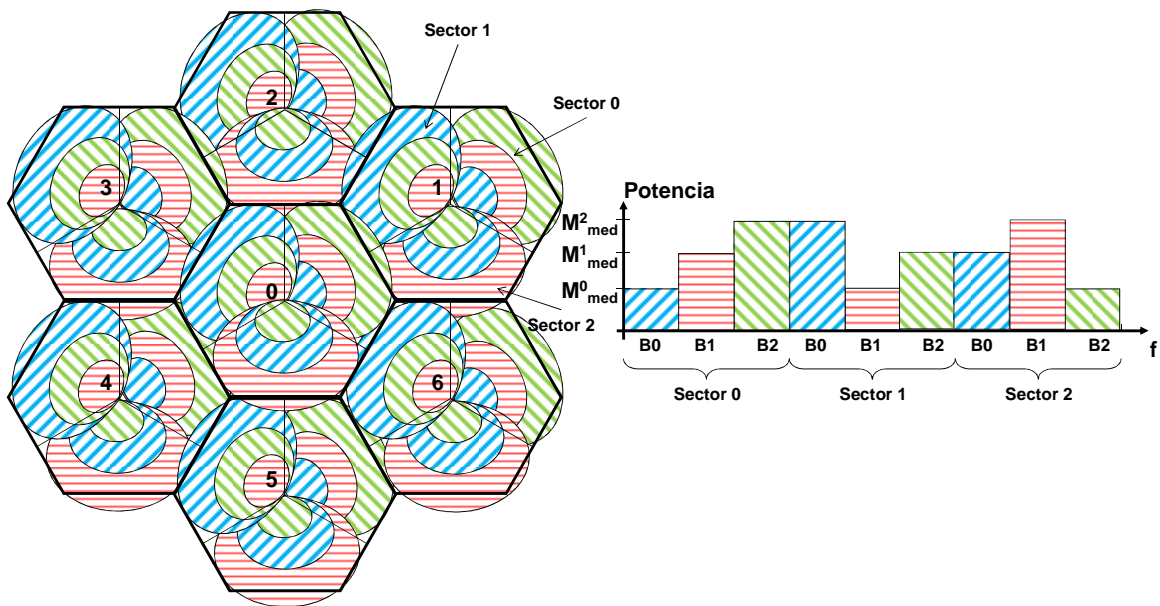


Figura 3.6: Sectorización frecuencial con máscaras de potencia a nivel de sector

Sectorización frecuencial con máscaras a nivel de celda: finalmente, en este esquema (Figura 3.7) se propone el uso de una misma máscara de potencia con $L=3$ niveles igual para todos los sectores de la celda, pero con una permutación distinta en celdas contiguas. Dicha permutación debe cumplir las siguientes

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

condiciones: celdas adyacentes deben tener máscaras distintas y la porción asignada para el exterior en un sector debe ser la que menos potencia transmita en el sector más interferente. Por ejemplo, la porción asignada para el exterior del sector 0 de la celda 1 se corresponde con la porción dedicada a la zona interior del sector 0 de la celda 0, que es su sector potencialmente más interferente. Con este método se consigue reducir la interferencia en la zona exterior y por tanto se mejoran las condiciones de canal que observan estos usuarios del límite de la celda. La permutación de las máscaras también puede verse como un clúster de L celdas (marcado en amarillo en la figura), cada una de ellas con una permutación distinta, y cuya replicación permite generar el despliegue completo de la red.

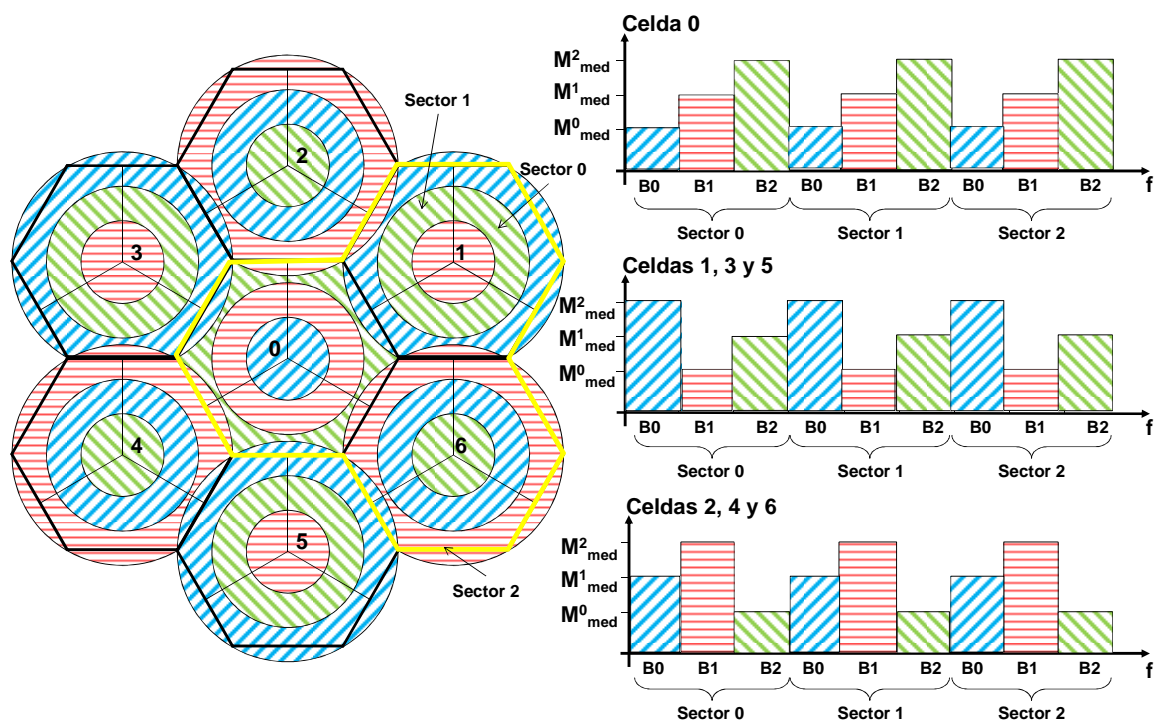


Figura 3.7: Sectorización frecuencial con máscaras de potencia a nivel de celda

3.1.2.3 Mecanismos basados en sectorización por códigos

Para obtener una comparación con un mayor número de opciones, además de la sectorización frecuencial se va a considerar también una sectorización

basada en códigos ortogonales. En este tipo de sectorización, cada sector ensancha sus símbolos de datos con una secuencia-código de longitud C , ortogonal a las utilizadas por los otros sectores de la celda. Dado que este ensanchado solo está destinado a mantener la ortogonalidad entre sectores de la misma celda, con secuencias-código de tamaño $C=N_{sec}=3$ es suficiente.

De entre las opciones existentes para estas secuencias-código, se ha optado por los códigos de rotación de fase propuestos por el 3GPP para LTE [R1-062712, 2006]. En la ecuación (3.4) se muestra la expresión concreta de esta familia de códigos particularizada para el caso de $C=3$. Al multiplicar en recepción por el conjugado del código correspondiente se puede obtener el símbolo transmitido por cada sector de la celda, mientras que los símbolos del resto de sectores quedan anulados por la ortogonalidad entre códigos.

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \quad 1 \quad 1] \\ c_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \\ c_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.1.3 Evaluación de los Mecanismos de Coordinación de ICI

En este apartado se describen de forma detallada las condiciones en las que se han realizado las simulaciones para la comparación de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura, así como los resultados y conclusiones que pueden extraerse de dicha comparación.

3.1.3.1 Condiciones de simulación

La comparativa aquí presentada se basa en medir los valores de SINR promedio por RB que los distintos algoritmos son capaces de ofrecer a los

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

usuarios a lo largo del área de cobertura de la celda asumiendo una potencia de transmisión constante. Para ello se computarán los valores promedio de SINR que se miden a lo largo de tres trayectorias radiales mostradas en la Figura 3.8, que son representativas de las distintas condiciones que pueden darse dentro de la celda.

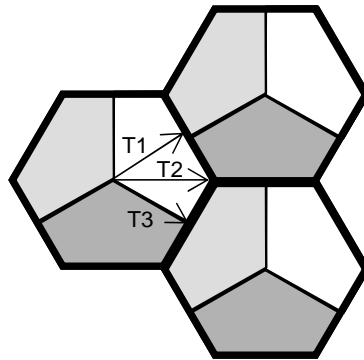


Figura 3.8: Trayectorias para la evaluación de mecanismos de coordinación

La evaluación de los mecanismos de coordinación de ICI se lleva a cabo en condiciones de saturación, lo que implica que cada sector transmite en todos sus RBs utilizando la potencia de transmisión marcada por la máscara de potencia correspondiente. No se implementa por tanto ningún mecanismo de adaptación del enlace que ajuste la potencia a las condiciones de canal. En el caso de los mecanismos que no contemplan sectorización, puesto que la interferencia puede provenir de cualquier sector de las celdas vecinas, se decidirá por medio de una variable aleatoria qué sector transmite potencia en cada RB, emulando así de forma fidedigna el comportamiento de estos mecanismos. Además, en cada posición de medida se promediarán un número suficiente de muestras para mitigar el impacto de la aleatoriedad del canal y poder analizar así aisladamente el efecto del mecanismo de coordinación.

A continuación se describen otras consideraciones realizadas a la hora de definir el modelado del sistema y llevar a cabo las simulaciones. En todos los

casos se seguirán las directrices de [TR36.942, 2010], donde se recomienda un juego de parámetros para las simulaciones del sistema LTE.

Simulación del despliegue de red

Para evitar los efectos de borde al no simular una red infinita, el clúster de $N_{BS}=19$ celdas se simulará haciendo uso de la técnica *wrap-around*, que se basa en considerar que celdas suficientemente alejadas, y por tanto altamente incorreladas, son celdas vecinas. De este modo se puede emular una red de grandes dimensiones con un conjunto reducido de celdas simuladas y tomar estadísticas válidas en todas ellas. Para un clúster de $N_{BS}=19$ celdas como el mostrado en la Figura 3.9, la técnica *wrap-around* hace que por ejemplo, la celda 8 aparezca como vecina de la 13 y 14 aun cuando se encuentran en el otro extremo del clúster simulado.

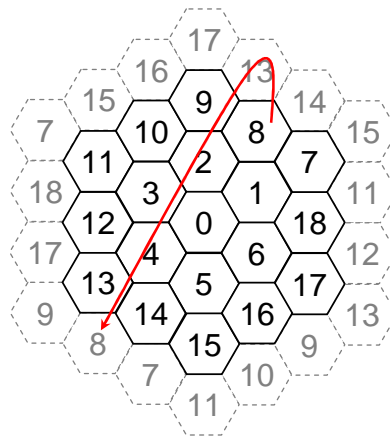


Figura 3.9: Técnica de wrap-around

Generación de interferencias

Dado que en las redes celulares OFDMA la interferencia intercelular e intersector son los factores dominantes (varios órdenes de magnitud por encima del ruido), su impacto en las prestaciones ofrecidas por los distintos algoritmos es determinante. Es por esto que para realizar la evaluación de prestaciones en un escenario más realista, se evita el uso de modelos de interferencia y se

emulará de forma explícita la transmisión de señal por parte de todas las BSs del escenario. Puesto que la interferencia intercelular experimentada por un usuario se debe en gran medida a las celdas más próximas, en las simulaciones se va a considerar únicamente la contribución correspondiente a las celdas del primer anillo interferente, es decir, las 6 celdas que colindan con la celda en la que se encuentra el usuario (Figura 3.10).

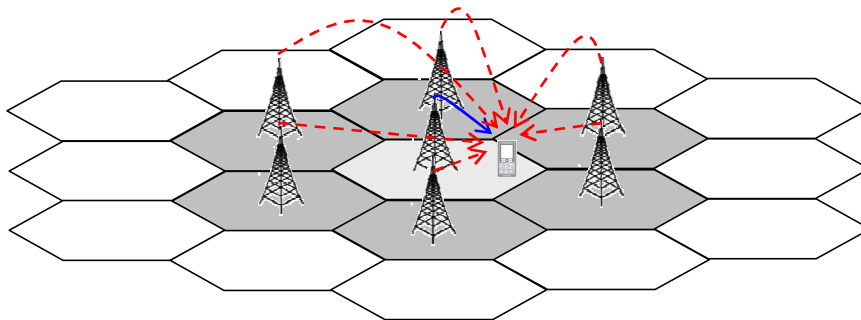


Figura 3.10: Señal útil (azul) e interferentes (rojo) del primer anillo

En el caso de FFR, la interferencia puede provenir de cualquiera de los sectores de las celdas vecinas puesto que no hay restricciones entre sectores a la hora de asignar los RBs. Este efecto será emulado en las simulaciones, tal y como se ha comentado anteriormente, asumiendo que cada sector de las celdas vecinas tiene $1/3$ de probabilidades de asignar un determinado RB. Así, para estimar la SINR promedio a lo largo de una determinada trayectoria asumiremos que todos los RBs de la celda útil se transmiten en el sector correspondiente a dicha trayectoria, mientras que en las celdas interferentes, se decidirá aleatoriamente qué sector transmite cada uno de los RBs.

Modelo de canal

En las simulaciones de sistema resulta especialmente determinante modelar con precisión los distintos efectos de primer nivel derivados del canal radio, de modo que los resultados obtenidos por medio de simulaciones sean representativos de lo que podría suceder en un sistema real. El modelo de canal

considerado a lo largo de esta tesis contempla tres partes fundamentales, como son las pérdidas de propagación con la distancia, los desvanecimientos lentos y los desvanecimientos rápidos:

- Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación se corresponden con la atenuación media que sufre la señal dependiendo de la frecuencia del sistema y de la distancia entre transmisor y receptor. Siguiendo las recomendaciones del 3GPP [TR36.942, 2010], el modelo utilizado en las simulaciones se muestra en la ecuación (3.5) donde d es la distancia entre transmisor y receptor expresada en km:

$$L_p(dB) = 128.1 + 37.6 \log_{10} d \quad (3.5)$$

- Desvanecimientos lentos

Los desvanecimientos lentos o *shadowing* son las pérdidas que experimenta la señal como resultado de la presencia de grandes obstáculos en la trayectoria de propagación, como pueden ser colinas o grandes edificios. Las pérdidas introducidas por el shadowing se modelan por medio de una variable aleatoria (ζ_c) de distribución lognormal con desviación típica σ ajustable.

En un escenario real, los desvanecimientos debidos a los grandes obstáculos no varían excesivamente entre dos posiciones cercanas, o dicho de otro modo, existe un cierto grado de correlación espacial en el shadowing. Se define por tanto una distancia de correlación ($d_{cor}=50m$), que puede entenderse como la distancia entre dos puntos tal que, en un escenario dado, presentan valores del shadowing incorrelados.

Además de esta correlación a pequeña escala, existe también una correlación macroscópica entre las distintas celdas del escenario, lo que reproduce el hecho de que los obstáculos que puede encontrarse la señal entre un usuario y las BSs cercanas de su entorno son por lo general similares. Para modelar este efecto, se

utiliza una segunda variable aleatoria lognormal (ξ) con desviación típica σ , común a todos los caminos de propagación de la señal hacia un mismo usuario. Así, el valor final de shadowing en un camino de propagación determinado (ζ_k) se obtiene como una ponderación de las dos lognormales: la común a todos los caminos y la propia de cada uno de ellos, como se muestra en la ecuación (3.6). En entornos urbanos suele utilizarse un valor de $a^2=b^2=0,5$, lo que significa que hay un 50% de correlación en el shadowing entre celdas.

$$\zeta_k(dB) = a \cdot \xi_k(dB) + b \cdot \xi(dB) \quad \text{con} \quad a^2 + b^2 = 1 \quad (3.6)$$

Debido a que la evolución del shadowing es extremadamente lenta en comparación con el resto de componentes aleatorias del canal, en estas primeras simulaciones se ha optado por no tomarlo en consideración para evitar que el valor concreto del mismo en un determinado instante desvirtúe los resultados obtenidos. Esto supone fijar una desviación típica de 0dB en todos los caminos de propagación. Por tanto, es importante notar que los resultados obtenidos con estas simulaciones presentan una componente menos de variabilidad frente a un escenario real.

- Desvanecimientos rápidos

Los desvanecimientos rápidos o *Rayleigh* son desvanecimientos selectivos en frecuencia que se deben al efecto combinado de la propagación multicamino y la movilidad del terminal, como se muestra gráficamente en la Figura 3.11. Como consecuencia de la propagación multicamino, la suma de la contribución de varios caminos puede provocar nulos de recepción en determinadas subportadoras o picos de ganancia en otras. Dado que los usuarios observarán perfiles Rayleigh distintos, el scheduler puede aprovechar esta diversidad multiusuario para asignarlos en aquellas subportadoras donde tengan mejores condiciones de canal, pudiendo de este modo utilizar una MCS más eficiente y obteniendo así un mejor aprovechamiento del espectro.

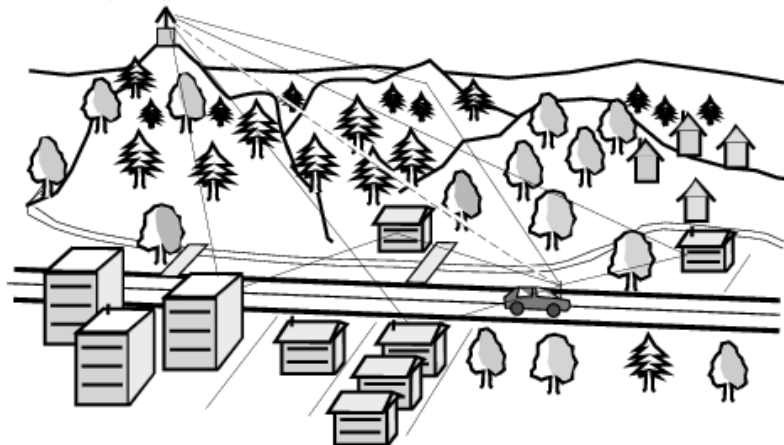


Figura 3.11: Ejemplo de propagación multicamino

La propagación multicamino se modela normalmente en base a modelos de canal de varios rayos donde la potencia de cada rayo representa la ganancia media del camino de propagación. Para considerar el efecto conjunto de propagación multicamino y movilidad, la potencia de cada rayo se genera mediante una estadística Rayleigh con el valor promedio dado. Los modelos multicamino considerados a lo largo de esta tesis se muestran en las siguientes tablas, que se corresponden con los modelos propuestos por el 3GPP en el desarrollo de LTE [TR36.104, 2010].

Tabla 3.1: Pedestrian-A extendido (3km/h)

<i>Retardo del camino (ns)</i>	<i>Potencia relativa (dB)</i>
0	0.0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0
190	-17.2
410	-20.8

Tabla 3.2: Typical Urban extendido (120km/h)

<i>Retardo del camino (ns)</i>	<i>Potencia relativa (dB)</i>
0	-1.0
50	-1.0
120	-1.0
200	0.0
230	0.0
500	0.0
1600	-3.0
2300	-5.0
5000	-7.0

Además del efecto en la potencia de señal debida a la suma de los distintos rayos que conforman el canal de propagación, es importante resaltar que las réplicas de la señal provocan interferencia inter-simbólica cuando el retardo del rayo es superior a la duración del prefijo cíclico. En las simulaciones presentadas en esta tesis asumiremos que el prefijo cíclico es capaz de absorber todas las réplicas del canal sin que exista interferencia. Sin embargo, la velocidad de desplazamiento del usuario provoca una dispersión en frecuencia denominada efecto Doppler que se traduce en un batido de las componentes frecuenciales de la señal. Este efecto se modela variando la potencia relativa de los rayos del canal, de tal forma que los desvanecimientos rápidos presentan cierta coherencia temporal, cambiando más lentamente para velocidades bajas de desplazamiento del usuario ya que el entorno varía más lentamente. Podemos definir por tanto un tiempo de coherencia del canal τ_c que indica el tiempo que ha de transcurrir hasta que los desvanecimientos rápidos pueden considerarse incorrelados. El tiempo de coherencia es, lógicamente, inversamente proporcional a la velocidad de desplazamiento del móvil, pues cuanto más rápido se desplaza, más cambia el entorno de propagación y, por tanto, los desvanecimientos rápidos. De las distintas relaciones que pueden encontrarse en la literatura, en todas las simulaciones se utiliza la mostrada en (3.7), donde f_D es la frecuencia Doppler del terminal, v es su velocidad media de

desplazamiento y c es la velocidad de la luz. Una vez fijada la velocidad de cambio de los desvanecimientos, la potencia de cada rayo del modelo se ajusta de acuerdo con el modelo clásico de Jakes para considerar el efecto Doppler [Jakes, 1975].

$$\tau_c = \frac{0,423}{f_D} = \frac{0,423}{\frac{v}{c} f_c} \quad (3.7)$$

Valores de las máscaras de potencia

Para definir los valores de la máscara de potencia a utilizar en cada algoritmo se ha considerado como premisa que se deben ofrecer unas condiciones de SNR similares en los extremos de las tres zonas concéntricas de igual superficie en las que se ha dividido la celda. Basándose en el modelo de propagación se puede estimar el incremento de potencia requerido para obtener una SNR similar en el límite de cada zona Δ_l , con lo que el valor de la máscara de potencia en el nivel l (M_{med}^l) se puede obtener a partir del nivel anterior $l-1$ y el incremento Δ_l tal y como expuso en el apartado 3.1.2:

$$M_{med}^l = M_{med}^{l-1} + \Delta_l \quad l = 1, \dots, L-1 \quad (3.8)$$

A la hora de definir los valores concretos que toma la máscara de potencia es preciso tener en cuenta el número de RBs que potencialmente puede utilizar cada sector, puesto que debe garantizarse que ningún sector excede la potencia máxima (P_T^{max}) incluso cuando asigna todos los RBs potencialmente asignables, como se enuncia en la ecuación (3.9). En los algoritmos basados en sectorización frecuencial, un tercio del ancho de banda es transmitido siempre por cada sector. Sin embargo, en los casos de FFR y sectorización por códigos, un único sector puede transmitir todos los RBs, con lo que hay que presupuestar la máscara de potencia asumiendo que el número de RBs potencialmente asignables por un sector s ($N_{RB,l}^s$) es el número total de RBs (N_{RB}).

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

$$\sum_{l=0}^{L-1} N_{RB,l}^s \cdot 10^{\frac{M_{med}^l (dBm/RB)}{10}} = P_T^{\max} \quad (3.9)$$

Resumiendo todo lo enunciado anteriormente y tomando otros parámetros típicos de las simulaciones en el sistema LTE [TR36.942, 2010], los parámetros generales de la simulación se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros de simulación

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Despliegue	19 celdas trisectorizadas, técnica wrap-around
Distancia entre estaciones base (R_{ISD})	1732m
Modelo de propagación	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d(km))$
Desviación típica del shadowing (σ)	0dB
Modelo de canal multicamino	Typical-Urban extendido
Ruido térmico	-174dBm/Hz
Ancho de banda del sistema	5MHz
Número de subportadoras totales (N_C)	512
Número de subportadoras totales (N_a)	270
Separación entre subportadoras (f_{SC})	15kHz
Periodo de scheduling (TTI)	1ms
Símbolos OFDM por TTI	14 (4 de ellos para control y pilotos)
Número de RBs (N_{RB})	27
Tamaño del RB ($N_{SC} \times N_T$)	10 subportadoras durante 10 símbolos OFDM
Tamaño del prefijo cíclico	16.6μs
Modulación	QPSK
Estimación de canal	Perfecta
Ecualización	Zero Forcing
Potencia máxima de transmisión (P_T^{\max})	43dBm
Ganancia de antena de la BS	15dB
Patrón de radiación de la antena de la BS	70° (-3dB) con 20dB de relación delante-atrás
Ganancia de antena del UE	0dB
Figura de ruido del receptor	5dB

Tomando en consideración estos parámetros, los valores de las máscaras de potencia para cada algoritmo se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Valores de las máscaras de potencia (dBm/RB)

Esquema de Coordinación	$l=0$	$l=1$	$l=2$
No Coordinación ($L=1: N^{s_{RB}}=27$)	28.68	-	-
FFR ($L=2: N^{s_{RB,0}}=18, N^{s_{RB,1}}=9$)	27.28	30.56	-
Sectorización Frecuencial ($L=1: N^{s_{RB}}=9$)	33,45	-	-
Sect. Frecuencial con Máscaras de Potencia (a nivel de sector o de celda) ($L=3: N^{s_{RB,0}}=N^{s_{RB,1}}=N^{s_{RB,2}}=3$)	27.23	32.89	36.21
Sectorización por Códigos ($L=1: N^{s_{RB}}=27$)	28.68	-	-
Sectorización por Códigos con Máscaras de Potencia ($L=3: N^{s_{RB,0}}=N^{s_{RB,1}}=N^{s_{RB,2}}=9$)	22.46	28.12	31.44

3.1.3.2 Resultados de simulación

En la Figura 3.12 se representan los valores medios de SINR por RB medidos a lo largo de las tres trayectorias propuestas, donde puede observarse que la tendencia de evolución de la SINR con la distancia es similar para las tres trayectorias. En lo que se refiere a FFR, podemos comprobar que las prestaciones son ligeramente inferiores al caso de no coordinación en la zona interior (por debajo de los 800 metros de distancia a la BS). Esto es debido a que los RBs interiores se ven interferidos por RBs de alta potencia de las celdas vecinas. En la zona exterior, sin embargo, el algoritmo FFR ofrece mejores prestaciones puesto que la interferencia proviene solo de RBs de baja potencia.

Para los sistemas basados en sectorización (tanto frecuencial como por códigos), la sectorización clásica y la sectorización con máscaras a nivel de sector ofrecen una elevada SINR en el centro de la celda, pero las prestaciones logradas en la zona exterior son realmente pobres. Solo las máscaras a nivel de

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

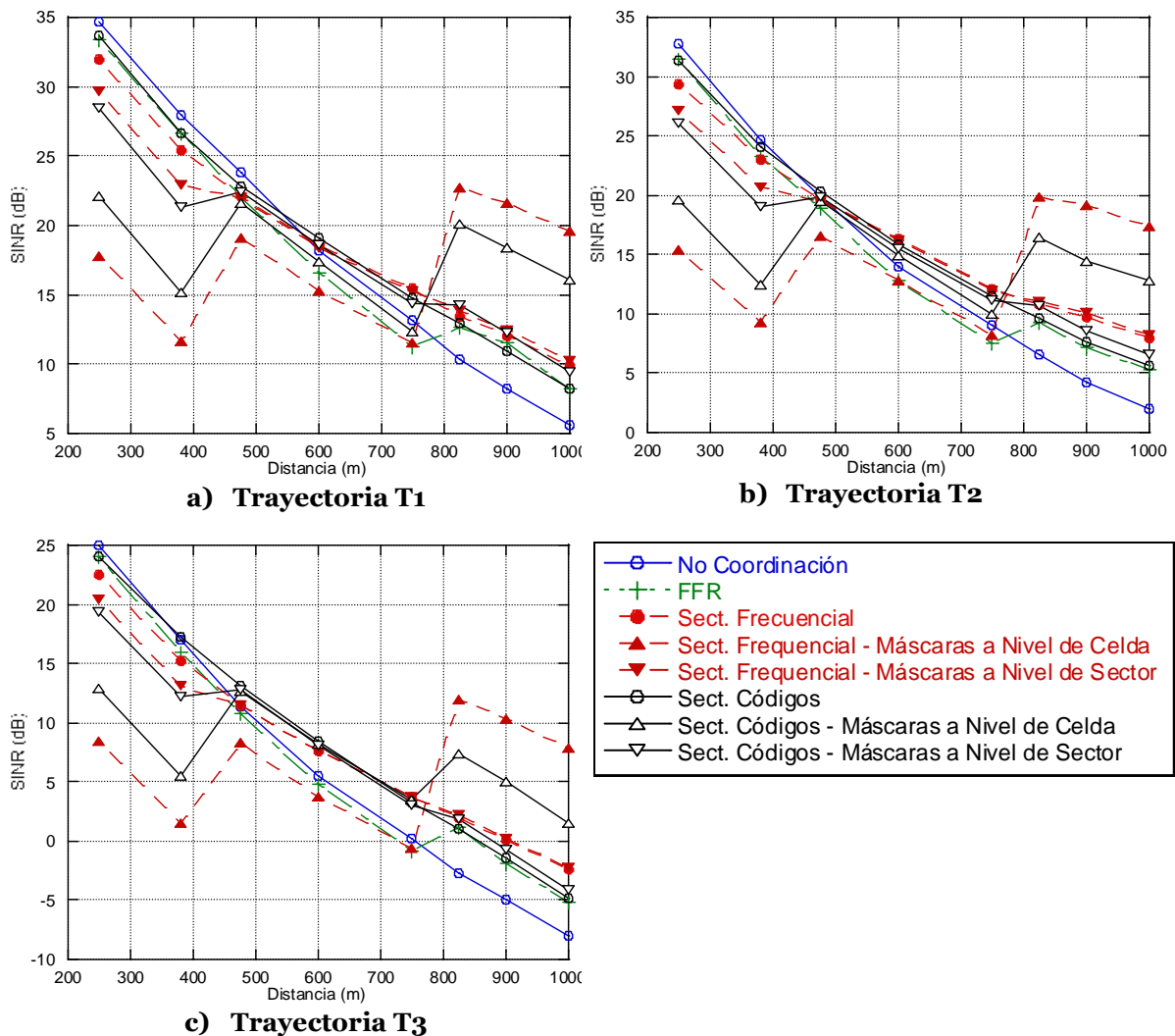


Figura 3.12: SINR recibida para los distintos mecanismos de coordinación

celda proporcionan una buena SINR en dicha zona, a costa de una reducción en las prestaciones en el interior de la celda. Por otro lado, en las gráficas puede apreciarse que las máscaras a nivel de celda presentan una SINR más homogénea a lo largo de cada trayectoria, lo que es crucial para el diseño de algoritmos de scheduling equitativos que ofrezcan similares oportunidades de acceso independientemente de la localización de los móviles.

Atendiendo a los dos modos de sectorización, las gráficas indican que la sectorización por frecuencia y por código ofrecen similares prestaciones, salvo en la zona exterior, donde la sectorización frecuencial se comporta mejor. Esto

es debido a que los desvanecimientos Rayleigh introducen pérdidas distintas en cada subportadora OFDM, lo que se traduce en una pérdida de ortogonalidad entre los códigos de celdas vecinas y provoca la aparición de interferencia entre usuarios de sectores colindantes. Sin embargo, cuando se aplica sectorización frecuencial, la señal proveniente de los sectores colindantes de otras celdas no provoca interferencia por transmitirse en otras subportadoras.

Finalmente, si comparamos las prestaciones entre FFR y sectorización, podemos comprobar que el primero ofrece mejores prestaciones en términos de SINR promedio en la zona interior, empeorando a medida que el usuario se acerca a los límites de la celda, donde los sistemas basados en sectorización ofrecen siempre unas mejores prestaciones. Sin embargo, el problema principal de los esquemas FFR es la variabilidad de la interferencia, puesto que en un TTI dado, la interferencia en cada RB puede venir de un sector distinto de las celdas vecinas. Esto puede comprobarse en la Figura 3.13, donde se representa la desviación típica en dB de la SINR por RB para la sectorización frecuencial clásica y para el esquema FFR planteado. Este último presenta una desviación 2dB superior por el efecto antes mencionado. Cuando se añada el efecto de los desvanecimientos lentos y la potencia de transmisión no se mantenga constante, sino que se ajuste por algún mecanismo de adaptación del enlace, esta variabilidad será aún más acusada, lo que implica que a la hora de asignar recursos, el scheduler tendrá mayor dificultad para estimar las condiciones reales en las que se va a producir la transmisión al usuario. Esto se traduce en un mayor número de errores en la asignación de recursos radio que conllevan un incremento del número de bloques de datos recibidos erróneamente, perdiéndose eficiencia en el enlace radio.

3.1 Comparativa de mecanismos de coordinación de ICI por cobertura

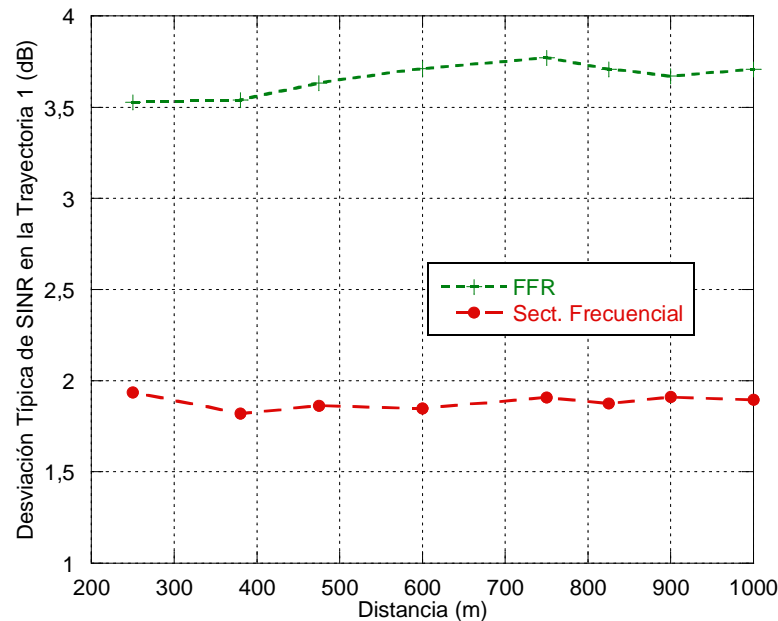


Figura 3.13: Desviación típica de la SINR en la trayectoria 1

A modo de resumen se puede concluir que la sectorización frecuencial con máscaras de potencia a nivel de celda es el sistema que mejores prestaciones globales ofrece en términos de calidad de señal. Estas máscaras permiten reducir la interferencia experimentada por los usuarios del exterior de la celda, lo que permitiría ofrecer un mejor servicio a estos usuarios. Sin embargo, es preciso analizar también la capacidad real del mecanismo de control de ICI para proporcionar una buena accesibilidad a los recursos radio en toda la celda al tiempo que se garantiza una calidad de SINR suficiente. Para ello, en el siguiente apartado se proponen una serie de algoritmos de asignación de recursos radio basados en este mecanismo de control de ICI en los que la potencia de transmisión será otro recurso a gestionar dinámicamente por el algoritmo.

3.2 Control de la ICI y algoritmos de asignación dinámica de potencia y recursos frecuenciales

De la comparativa realizada anteriormente se desprende que el uso de sectorización frecuencial junto con máscaras de potencia a nivel de celda es el mecanismo de control de ICI que ofrece unas mejores prestaciones en términos de SINR, especialmente en los límites de la celda. No obstante, es cierto que los esquemas FFR, ampliamente aceptados en la literatura, ofrecen mayor flexibilidad en la asignación de recursos a costa de unas condiciones de SINR promedio peores. Por este motivo, parece deseable contemplar en un análisis más profundo una propuesta de coordinación de ICI que conjugue la flexibilidad de la asignación de recursos propia de FFR con el control más efectivo de la ICI de los esquemas sectorizados. El objetivo de este apartado es abordar el problema de la gestión de recursos en toda su extensión, contemplando los mecanismos de coordinación de ICI conjuntamente con los algoritmos de asignación dinámica de potencia y subportadoras que operan a nivel de paquete. Hay que tener en cuenta que todos estos mecanismos, totalmente interrelacionados entre sí, repercuten de forma conjunta en la gestión de la ICI y en las prestaciones finales que puede ofrecer el sistema. En concreto, en este apartado se proponen y evalúan una serie de estrategias para la asignación dinámica de recursos radio totalmente integradas con un esquema de coordinación de ICI basado en sectorización con máscaras a nivel de celda, puesto que son la solución que en un principio, ofrece un mejor comportamiento en términos de SINR. Las prestaciones de estos algoritmos se compararán con otros esquemas simples que pueden encontrarse en la literatura para evaluar sus posibles ventajas y potenciales inconvenientes: por un lado, el algoritmo básico propuesto para un esquema de sectorización con máscaras de potencia se aplicará también a una sectorización clásica para determinar de este modo la ganancia real que ofrecen dichas máscaras cuando ha de ofrecerse servicio a usuarios localizados en cualquier punto de la celda.

Por otra parte, se incluye también en la comparativa un esquema basado en soft-FFR para de este modo analizar las ventajas reales que supone un esquema con mínimas restricciones a la asignación de usuarios en una situación más realista.

En los algoritmos propuestos a continuación se considera únicamente la asignación de subportadoras y potencia, mientras que la modulación utilizada en la transmisión de datos será la misma para todos los usuarios (el ajuste dinámico de la MCS será abordado en los siguientes capítulos de esta tesis). De las múltiples opciones que pueden encontrarse en la literatura en el contexto del scheduling frecuencial, en este apartado se proponen soluciones realistas que asumen las restricciones que se dan en un sistema real basado en OFDMA. Por ejemplo, se asumirá que la asignación de recursos se realiza a nivel de RB y no de subportadora como algunas propuestas abogan, debido al gran consumo de señalización que esto implicaría. Del mismo modo, se evitarán los algoritmos matemáticos por su limitada aplicabilidad en sistemas reales y nos centraremos en el diseño de soluciones heurísticas para el scheduling frecuencial y ajuste dinámico de potencia, ya que permiten integrar la coordinación de interferencias en la propia asignación de recursos sin que la complejidad del algoritmo aumente enormemente. El objetivo será aprovechar la diversidad multiusuario proporcionada por los sistemas OFDMA para encontrar el mejor reparto de RBs posible. Tomando en consideración las restricciones impuestas por el mecanismos de coordinación de ICI, los usuarios serán principalmente asignados en aquellos RBs en los observan un mejor canal, y por tanto sean capaces de lograr una mayor tasa de datos. Al mismo tiempo, la potencia de transmisión se ajustará dinámicamente para garantiza una cierta calidad de señal, que permita demodular los datos con una determinada tasa de error para una modulación dada.

En la evaluación de los algoritmos de control de ICI y asignación de recursos presentada en este apartado se va a asumir un modelo simplificado del sistema para centrarnos en la evaluación detallada de los algoritmos de scheduling en condiciones de elevada carga, donde sus diferencias son más evidentes. En este sentido, vamos a aplicar un modelo full-buffer en el que todos los usuarios del sistema tienen datos pendientes de ser transmitidos y con igual prioridad. No se tendrán en cuenta por tanto el modelo de tráfico de los usuarios ni el estado de los buffers, con lo que no existirá una correlación temporal en el sistema. De ahí que se aplique también un modelo de canal simplificado en el que el perfil del canal está incorrelado entre dos subtramas consecutivas. Sin embargo, con el fin de obtener una primera impresión de la flexibilidad del algoritmo en situaciones de alta carga, los usuarios serán agrupados aleatoriamente en usuarios prioritarios y no prioritarios de modo que sea posible analizar la capacidad del algoritmo para gestionar la QoS. Una vez evaluadas en detalle las propuestas en escenarios de carga homogénea, se evaluarán a continuación las limitaciones en cuanto a distribuciones heterogéneas de carga entre sectores. Las conclusiones principales extraídas de este análisis se refrendarán con la evaluación mostrada en el apartado 3.3, en la que se aplicará ya en su totalidad un modelo del sistema completo que tiene en cuenta la correlación temporal del canal y el tráfico de los usuarios.

El resto del apartado se organiza como sigue: en primer lugar se describen los aspectos comunes en los que se apoyan los diferentes algoritmos de asignación de recursos propuestos, para posteriormente definir detalladamente cada uno de ellos. Finalmente, se presenta una evaluación de las distintas propuestas en términos de calidad de señal y accesibilidad, que permitirá determinar la mejor solución de compromiso para luego diseñar algoritmos más complejos para unas condiciones más realistas que adapten también la tasa transmitida por RB en función de las condiciones de canal y de los requisitos de tráfico del usuario.

3.2.1 Aspectos Comunes de Diseño para los Algoritmos de Asignación de Recursos

Los algoritmos de asignación dinámica de recursos propuestos a continuación trabajan todos bajo un determinado mecanismo de coordinación de ICI (FFR o sectorización) y utilizan máscaras de potencia para determinar la potencia a asignar en cada RB. Puesto que en estos algoritmos la potencia de transmisión es un recurso a repartir dinámicamente por el scheduler, los algoritmos contemplan dos límites en la potencia de transmisión en cada subportadora o RB:

- El primero de los límites (M_{med}) debe garantizar a priori, un reparto equitativo de la potencia entre las distintas subportadoras o RBs de una banda determinada. En concreto este límite se fija como la potencia a la que deberían transmitir las distintas subportadoras de modo que, en total, la potencia transmitida por la BS sea igual al límite máximo (P_T^{max}). Con esta premisa se evita que determinadas subportadoras no puedan ser asignadas en primera instancia por falta de potencia. En cualquier caso, la potencia finalmente asignada a un usuario podría ser inferior al valor M_{med} dependiendo de las condiciones de canal que observa. Por ejemplo, la potencia requerida por un usuario próximo a la BS será inferior a la requerida por un usuario de la zona exterior. Así, si se asigna poca potencia al usuario del interior, la potencia restante hasta el límite M_{med} contribuye a la creación de un margen de potencia que se reinvierte en incrementar la potencia transmitida para los usuarios con menor ganancia de canal, hasta un máximo de potencia transmitida fijado por el siguiente límite.
- El segundo límite (M_{max}) igual o superior al anterior, suele venir impuesto por la recomendación de los estándares a fin de limitar la

potencia máxima de transmisión por unidad de frecuencia. Por ejemplo, en el caso de LTE, se establece un límite de 32dBm por RB. Este límite garantiza que la potencia transmitida no crece incontrolablemente, llevando al sistema a una situación de inestabilidad.

Estos valores M_{med} y M_{max} pueden no ser constantes a lo largo del ancho de banda del sistema. Por ejemplo, cuando se aplica una máscara de potencia a nivel de celda, redefinidos como M_{med}^l y M_{max}^l para cada nivel l , cambian de un nivel de la máscara a otro, aunque las condiciones generales enunciadas anteriormente sobre potencia total transmitida deben satisfacerse.

A continuación se enumeran otras suposiciones consideradas en los algoritmos de asignación de subportadoras y potencia con su debida justificación:

- Cada celda realiza las asignaciones de recursos sin conocimiento de las asignaciones realizadas en las celdas vecinas. De este modo se evita el intercambio continuo de señalización interna entre BSs para indicar las decisiones de scheduling.
- La unidad mínima de asignación de recursos tiempo-frecuencia a un usuario es el RB, aplicándose la misma potencia de transmisión a todas las subportadoras del RB.
- El scheduler maneja de forma coordinada las asignaciones de recursos (RBs y potencia) entre sectores de la misma celda, siempre bajo las restricciones impuestas por el mecanismo de coordinación de ICI.
- Un RB solo puede ser asignado a un UE en cada celda, de modo que no existen interferencias intracelulares.

- No se aplica ningún mecanismo de adaptación de la tasa de datos transmitida en cada RB dependiendo del estado del canal o del tráfico. Se asumirá por tanto que los usuarios disponen de suficientes datos en los buffers como para recibir una asignación en cualquier momento con la modulación elegida.
- Sin pérdida de generalidad y para desligar el efecto de los algoritmos de asignación de recursos de los de gestión de tráfico de usuario, se ha considerado un modelo full-buffer (los terminales siempre tienen datos para transmitir). Este modelo, que se utiliza normalmente en la evaluación de mecanismos de coordinación de ICI y scheduling frecuencial, no permite sacar conclusiones acerca de la flexibilidad del algoritmo para proporcionar la QoS demandada por los usuarios: al no priorizar los servicios, los recursos radio acaban siendo asignados a los usuarios con mejor canal y los usuarios del exterior de la celda acaban recibiendo un servicio limitado. Para emular de forma simple los requisitos de QoS en este modelo simplificado, los M usuarios de la celda se ordenan de forma aleatoria en cada instante de scheduling. De entre ellos, los N_P primeros se consideran usuarios prioritarios (PU), aquéllos que tienen una prioridad máxima a la hora de recibir una asignación, mientras que el resto se denominan no prioritarios (NPU) y no recibirán recursos a menos que tras asignar a los prioritarios, aún queden recursos libres. Dado que la distribución de PUs es aleatoria a lo largo de la celda, este esquema nos permitirá determinar también la capacidad del algoritmo para proporcionar la QoS demandada por los usuarios tanto en el interior como en el exterior de la celda. De este modo, la tasa de PUs asignados en cada TTI es una medida directa de la accesibilidad a los recursos radio proporcionada por el algoritmo y nos permitirá realizar un primer análisis de la flexibilidad del mismo para proporcionar la QoS requerida por los usuarios.

- Dado que en la evaluación aquí presentada no se pretende analizar la capacidad del algoritmo para gestionar los tráficos de los usuarios con distinta demanda de QoS (tasa, retardo...), se asumirá que un usuario siempre tiene datos para transmitir y solo puede recibir un RB en cada TTI.
- Las asignaciones de RBs y potencia de transmisión se realizan de forma conjunta para lograr una solución subóptima con buenas prestaciones. El objetivo general de los algoritmos de asignación de recursos radio presentados es minimizar la potencia total transmitida manteniendo los requerimientos de SINR de cada usuario para la modulación exigida. El problema de optimización puede expresarse como sigue:

$$\min P_{out} \quad \text{con} \quad P_{out} = \sum_{i=1}^{N_{RB}^s} P_i^s \leq P_T^{max} \quad \text{y} \quad s = 0, \dots, N_{sec} - 1 \quad (3.10)$$

donde N_{RB}^s es el número de RBs que el mecanismo de coordinación de ICI asigna al sector s y P_i^s la potencia transmitida en el RB i en el sector s , siendo N_{sec} el número de sectores. Se asume que todas las subportadoras del RB son transmitidas con la misma potencia.

- La BS dispone de conocimiento ideal del estado del canal (CSI) para cada uno de los UEs de la celda excluyendo los desvanecimientos Rayleigh. Aunque idealizado, esta suposición permite evaluar el sistema en un escenario más realista que la suposición de estimación ideal completa de canal. En este caso, se asume que el UE solo es capaz de indicar idealmente la estimación de aquellos parámetros que permanecen más o menos estables durante un cierto tiempo, como son las pérdidas por distancia, las pérdidas de antena y los desvanecimientos lognormales. De este conjunto de parámetros estimables se excluyen los desvanecimientos

Rayleigh ya que varían rápidamente y se asume que el UE no puede estimarlos e informar a la BS con la suficiente frecuencia.

- Con esta información la BS estima la potencia requerida por cada usuario k en un RB i ($P_{k,i}$), de modo que la señal recibida cumpla teóricamente con los requerimientos de SINR fijados para la tasa de datos exigida:

$$P_{k,i} = \frac{SINR_{k,req} \cdot (P_{N,i} + I_{k,i})}{h_{k,i}} \quad (3.11)$$

donde $h_{k,i}$ es la ganancia del canal para el usuario k en el RB i , $P_{N,i}$ e $I_{k,i}$ la potencia de ruido térmico y la interferencia en el RB i , y $SINR_{k,req}$ la SINR que necesita el usuario k para poder cursar su tasa de datos con la tasa de error deseada. No obstante, la SINR que el usuario finalmente reciba diferirá de la deseada debido a las fluctuaciones impredecibles de los desvanecimientos Rayleigh y de la potencia interferente.

3.2.1.1 Convenio de símbolos para la descripción de los algoritmos

Las siguientes tablas resumen la nomenclatura utilizada a lo largo de la descripción de los algoritmos de asignación dinámica de recursos que se presenta en los siguientes apartados.

Tabla 3.5: Parámetros relacionados con los UEs

M	Número de UEs activos en un instante de scheduling
N_p	Número de UEs prioritarios
Γ_{PU}	Lista de los UEs prioritarios
Γ_{NPU}	Lista de los UEs no prioritarios

Tabla 3.6: Parámetros relacionados con los RBs

N_{RB}, N_{RB}^s	Número de RBs disponibles en la celda o en el sector s
$N_{RB,l}, N_{RB,l}^s$	Número de RBs disponibles en el nivel l de la máscara en la celda o en el sector s
Φ_s^l	Lista de RBs no asignados en el nivel l de la máscara en el sector s
Ω_{RB}	Lista indicando a qué usuario se ha asignado cada RB. Por ejemplo, $\Omega_{RB}(i) = k$ si el RB i se ha asignado al UE k

Tabla 3.7: Parámetros relacionados con la potencia

$P_{k,i}$	Potencia requerida por el usuario k en el RB i . Esta potencia se calcula mediante la ecuación (3.11)
M_{med}^l, M_{max}^l	Límites medio y máximo de la máscara de potencia en cada RB i perteneciente al nivel l de la máscara
P_T^{\max}	Límite máximo de potencia que puede transmitir el sector
P_{out}	Acumula la potencia que ha sido asignada hasta el momento
P_{res}	Acumula el margen de potencia logrado hasta el momento. Cuando se asigna un RB con una potencia de transmisión inferior a M_{med}^l (de acuerdo con la máscara que corresponda), P_{res} se incrementa en una cantidad igual a $M_{med}^l - P_{k,i}$

3.2.2 Descripción de los Algoritmos de Asignación de Recursos

En los siguientes subapartados se describen de forma detallada los 5 algoritmos heurísticos propuestos para la asignación adaptativa de subportadoras y potencia bajo el marco común descrito anteriormente.

3.2.2.1 Sectorización frecuencial con máscaras a nivel de celda de tres niveles

Este algoritmo, denominado en adelante *FFS_3LevelMask*, utiliza sectorización frecuencial estática junto con máscaras a nivel de celda con $L=3$ niveles de potencia. Las decisiones de scheduling se toman de forma independiente en cada sector ($s=0, \dots, N_{sec}-1$) dado que cada uno recibe un tercio de la banda frecuencial y no hay coordinación entre ellos.

Los pasos seguidos por el algoritmo pueden enunciarse como sigue:

Paso 1: Para cada PU $k \in \Gamma_{PU}$ (inicialmente todos los PUs localizados en el sector) en orden de prioridad descendente, buscar en el nivel l de la máscara (comenzando por $l=0$) aquel RB i que todavía no ha sido asignado ($i \in \Phi_s^l$) donde el usuario k requiere una menor potencia. Si esta potencia es inferior al límite M_{med}^l , el RB es asignado al usuario y los valores P_{out} y P_{res} se actualizan correspondientemente:

$$\Omega_{RB}(i) = k \Leftrightarrow i = \arg \min \left\{ P_k^i \left| \begin{array}{l} i \in \Phi_s^l \wedge k \in \Gamma_{PU} \\ P_{k,i} \leq M_{med}^l \end{array} \right. \right\}$$

$$P_{out} = P_{out} + P_{k,i}$$

$$P_{res} = P_{res} + (M_{med}^l - P_{k,i})$$
(3.12)

En caso de no cumplirse estas restricciones, se prueba con el siguiente RB hasta haber intentado la asignación en todos los RBs del nivel. A continuación se vuelve a aplicar el paso 1 pero con el siguiente nivel de la máscara ($l=0 \dots L-1$). En este algoritmo podemos

apreciar que si un usuario requiere una potencia superior a la máscara media aunque sea en una ínfima cantidad, se intentará asignar en el siguiente nivel de la máscara antes de permitirle utilizar una potencia de transmisión superior. Por tanto, UEs que podrían utilizar una subbanda de baja potencia con un ligero incremento de potencia van a ocupar recursos de subbandas con mayor potencia de transmisión, limitando la entrada a usuarios que realmente necesitan esa mayor potencia de transmisión. Para evitar este efecto se propone una versión alternativa de este primer paso (3.13), en la que los UEs que exceden el límite M_{med}^l en un valor inferior al margen de potencia logrado hasta el momento (P_{res}) reciben la asignación. Esta será la opción que utilicemos en adelante.

$$\Omega_{RB}(i) = k \Leftrightarrow i = \arg \min \left\{ P_{k,i} \left| \begin{array}{l} i \in \Phi_s^l \wedge k \in \Gamma_{PU} \\ P_{k,i} \leq M_{med}^l + P_{res} \end{array} \right. \right\}$$

$$P_{out} = P_{out} + P_{k,i} \quad (3.13)$$

$$P_{res} = P_{res} - (P_{k,i} - M_{med}^l)$$

Cuando un RB es asignado hay que eliminarlo de la lista de RBs libres, así como quitar al UE de la lista de PUs:

$$\Phi_s^l = \Phi_s^l - \{i\}$$

$$\Gamma_{PU} = \Gamma_{PU} - \{k\} \quad (3.14)$$

Paso 2: En esta segunda iteración se asignan los RBs libres, comenzando por la subbanda de menor potencia $l=0$, a aquellos PUs no servidos cuya potencia de transmisión es inferior al límite M_{max}^l , siempre y cuando no se exceda el límite máximo de potencia transmitida en el sector:

$$\Omega_{RB}(i) = k \Leftrightarrow i = \arg \min \left\{ P_{k,i} \left| \begin{array}{l} i \in \Phi_s^l \wedge k \in \Gamma_{PU} \\ P_{k,i} \leq M_{max}^l \\ P_{out} + P_{k,i} \leq P_T^{\max} \end{array} \right. \right\} \quad (3.15)$$

$$P_{out} = P_{out} + P_{k,i}$$

$$\Phi_s^l = \Phi_s^l - \{i\}$$

$$\Gamma_{PU} = \Gamma_{PU} - \{k\}$$

Paso 3: En la tercera iteración se intentan asignar los RBs libres a los usuarios no prioritarios con el valor medio de la máscara. Por tanto, el planteamiento es idéntico al paso 1 pero con la lista Γ_{NPU} en lugar de Γ_{PU} . Utilizamos el límite medio de la máscara en este paso ya que, al tratarse de NPUs y por tanto no haber obligación de servirlos en este momento, se prefiere asignar usuarios que requieran poca potencia y generen así pocas interferencias a otras celdas.

Paso 4: Finalmente, en el paso 4 se asignan los RBs libres a los NPUs con el límite máximo de la máscara, por lo que es similar al paso 2 pero con la lista Γ_{NPU} .

3.2.2.2 Reúso fraccional frecuencial (FFR_2LevelMask)

Como ya se ha comentado anteriormente, vamos a utilizar un algoritmo basado en un esquema FFR como referencia para analizar las limitaciones en cuanto a accesibilidad que ofrecen los esquemas basados en sectorización con máscaras a nivel de celda. En concreto, se ha utilizado un esquema soft-FFR puesto que es el que menos restricciones impone en cuanto al acceso de usuarios a los recursos frecuenciales. Así, el esquema propuesto en este apartado y que se denomina *FFR_2LevelMask*, está basado en un mecanismo de coordinación de soft-FFR añadiendo las máscaras M_{med}^l y M_{max}^l , que en este caso tienen dos niveles correspondientes a la subbanda interior y a la subbanda exterior.

En los esquemas FFR, los recursos frecuenciales no se asignan a priori a ningún sector, sino que todos tienen acceso a ellos. Así, un RB determinado puede ser asignado a cualquier UE de la celda, independientemente del sector al que pertenece, aunque la señal correspondiente solo será transmitida en el sector en el que el usuario está localizado. Esta libertad en la asignación de recursos frecuenciales hace que el conjunto de RBs asignados en cada sector varíe significativamente de un TTI a otro, lo que se traduce en cambios continuos en el espectro de potencia transmitido por cada sector. Este hecho incrementa de forma directa el grado de variabilidad de la potencia interferente, que se unirá a las fluctuaciones incontrolables del canal y de la potencia asignada, intrínsecas a cualquier algoritmo de asignación de recursos. Por tanto, cabe esperar en FFR_2LevelMask un incremento en la variabilidad de la potencia interferente, y consecuentemente en la SINR.

El algoritmo FFR_2LevelMask sigue el mismo esquema que FFS_3LevelMask pero actuando coordinadamente en los tres sectores de la celda, de modo que un mismo RB no pueda ser asignado más de una vez dentro de la celda. La única diferencia que se contempla en el caso de FFR_2LevelMask es que los RBs de la subbanda exterior ($l=1$) solo pueden asignarse a aquellos usuarios cuya potencia requerida en la subbanda interior excede el valor de M_{max}^l en dicha subbanda. Esta restricción evitará que los usuarios con buenas condiciones de canal ocupen los recursos de la subbanda exterior, reservando estos para los usuarios del exterior de la celda.

3.2.2.3 Sectorización adaptativa con máscaras a nivel de celda de 3 niveles

Este esquema, denominado *AFS_3LevelMask*, es similar a FFS_3LevelMask pero con una sectorización flexible: cuando un sector sufre una carga de tráfico elevada, puede “robar” RBs de otros sectores de la celda con baja carga. El robo

de RBs de otros sectores provoca un incremento en la ICI en celdas vecinas dado que se rompe con la sectorización frecuencial. Por tanto, los RBs robados deberían ser preferentemente asignados a los UEs que menor potencia de transmisión requieran en ellos. Del mismo modo, con el fin de limitar la ICI, es importante que el robo de RBs se lleve a cabo solo si los requisitos de tráfico realmente lo exigen. Por este motivo, si el número de PUs en un sector excede el número de RBs de dicho sector en una cantidad Z , el robo de RBs de otros sectores estará limitado a un máximo de Z RBs. Además, los NPU no pueden robar RBs puesto que es preferible mantener bajo control la ICI que ofrecer más recursos para los usuarios no prioritarios.

El algoritmo `AFS_3LevelMask` comienza identificando los sectores sobrecargados a partir de la lista de PUs. Cuando el número de PUs de un sector excede el número de RBs asignables en dicho sector (fijados por la sectorización frecuencial), el sector es considerado como sobrecargado. En el resto de sectores (los de baja ocupación) se aplican los dos primeros pasos del algoritmo `FFS_3LevelMask`: asignar recursos a los PUs de dichos sectores primero con la máscara media y luego con la máxima. Los RBs que queden libres en los sectores más descargados serán susceptibles de ser ocupados por otros los sectores más cargados. Dicho de otro modo, antes de incluir NPU en los sectores con menos ocupación, los RBs son cedidos a los sectores con mayor ocupación.

Los RBs robados a otros sectores serán asignados a los UEs que menor potencia de transmisión requieran en ellos y cumplan con la máscara de potencia, con el fin de minimizar la interferencia inducida en otras celdas. Después, los sectores sobrecargados aplicarán también los dos primeros pasos del algoritmo `FFS_3LevelMask` para asignar sus RBs al resto de usuarios del sector (los UEs asignados en RBs robados no se consideran ahora). Si alguno de estos RBs queda sin ser asignado por la razón que sea, el algoritmo intentará

recuperar a los UEs que están ocupando RBs robados de otro sector y asignarlos en dichos RBs libres, siempre y cuando se cumpla con las máscaras de potencia. El objetivo es, por tanto, mantener la sectorización frecuencial en la mayor parte de las ocasiones para controlar la ICI pero sin estar limitados por la rigidez en la división de recursos de ésta.

Finalmente, cada sector intentará asignar los RBs que queden libres en su ancho de banda a sus NPU. En este caso no se contempla el robo de RBs, es decir, los NPUs pueden recibir exclusivamente RBs de su propio sector. Para llevar a cabo estas asignaciones, cada sector ejecutará de forma independiente los pasos 3 y 4 de FFS_3LevelMask.

3.2.2.4 FFS_3LevelMask y AFS_3LevelMask con ordenación por potencia

Los algoritmos que contemplan la ordenación por potencia, denominados *FFS_3LevelMask_po* y *AFS_3LevelMask_po*, son idénticos respectivamente a FFS_3LevelMask y AFS_3LevelMask salvo en un aspecto: antes de comenzar la asignación de RBs, los PUs de cada sector son reordenados atendiendo a sus condiciones de canal, de modo que el PU que recibe una mayor prioridad de asignación es aquel con unas peores condiciones de canal promedio. Esta reordenación evita que los usuarios interiores ocupen los pocos recursos en los que los usuarios exteriores cumplen con las restricciones de las máscaras de potencia. Es esperable por tanto que la ordenación por potencia suponga un incremento en los porcentajes de acceso de los UEs del exterior de la celda. Una vez se ha producido la reordenación de PUs, estos algoritmos proceden como sus correspondientes versiones sin ordenación de potencia, incluyendo el robo y recuperación de RBs en caso de que sea necesario.

3.2.2.5 Gestión adaptativa de la potencia para la reducción de las fluctuaciones de la ICI

Todos los esquemas descritos anteriormente sufren potencialmente de fluctuaciones en la ICI de un instante de scheduling a otro como resultado de la asignación de recursos en las celdas próximas y de las variaciones del canal. Tal y como se comentó en el capítulo 2, estas fluctuaciones tienen un mayor impacto en las prestaciones de los sistemas basados en OFDMA que en otras tecnologías de acceso, como por ejemplo WCDMA. La interferencia en los sistemas OFDMA presenta típicamente un comportamiento a ráfagas y altamente variable, resultado de que son pocas las fuentes de interferencia cocanal (típicamente las celdas vecinas del primer anillo interferente) y las asignaciones de recursos pueden cambiar completamente de una subtrama a otra. Lograr una estimación suficientemente precisa de la ICI puede ser una tarea muy compleja, lo que puede traducirse en una reducción de la eficiencia de los algoritmos de scheduling frecuencial. En este sentido, se propone el algoritmo *FFS_3LevelMask_min* que explorará las opciones para reducir la variabilidad de la interferencia en sistemas OFDMA para lograr una estimación más precisa.

Una forma directa de estabilizar de la potencia interferente en un esquema sectorizado pasa por reducir la variabilidad de la potencia transmitida en cada RB. Para lograr esto basta con fijar un umbral mínimo de potencia transmitida por RB, que podemos ver como una máscara de potencia mínima M_{min}^l , de modo que si la potencia requerida en un RB es inferior a este valor, la potencia realmente transmitida es M_{min}^l .

El uso de una máscara mínima de potencia transmitida tiene dos efectos colaterales: el margen de potencia logrado (P_{res}) se reduce significativamente ya que la potencia transmitida por RB no puede ser tan pequeña como se desee y

está limitada al valor M_{min}^l . Esta reducción del margen implica que menos usuarios cuya potencia requerida excede M_{med}^l van a poder recibir una asignación. Por otro lado, los usuarios con unas condiciones de canal muy favorables experimentan un gran margen de interferencias debido a que hay una gran diferencia entre su potencia requerida y la potencia asignada M_{min}^l . Este margen puede explotarse si estos RBs con elevado margen son asignados en la celda más interferente a los usuarios que más potencia transmitida requieren en ella y, por tanto, más interferencia generan. Esto se denomina *permutación de las asignaciones*.

Con el fin de no complicar en exceso el algoritmo de asignación de RBs, la permutación debe basarse en una función sencilla relacionada también con la permutación de la máscara de potencia, con lo que se puede obtener una a partir de la otra. Un ejemplo gráfico de la permutación para FFS_3LevelMask_min puede verse en la Figura 3.14, donde por claridad se muestra únicamente la subbanda correspondiente al sector 0 de las celdas. Las flechas y los números en los RBs indican el orden de asignación. De acuerdo con la figura, el sector 0 de la celda 0 es el más interferente al sector 0 de la celda 1 puesto que la dirección de máxima radiación de sus antenas es la misma. Por tanto, en todos sus sectores, la celda 0 asigna los RBs de cada nivel de la máscara en orden 0-1-2 (siendo el RB marcado como 0 el primero asignado), mientras que la celda 1 utiliza 1-2-0 y la celda 2, 2-0-1. Se puede apreciar claramente que en cada nivel, el primer RB asignado en la celda 1 (el número 0) es el último asignado en la celda 0 (número 2) y potencialmente el más interferente.

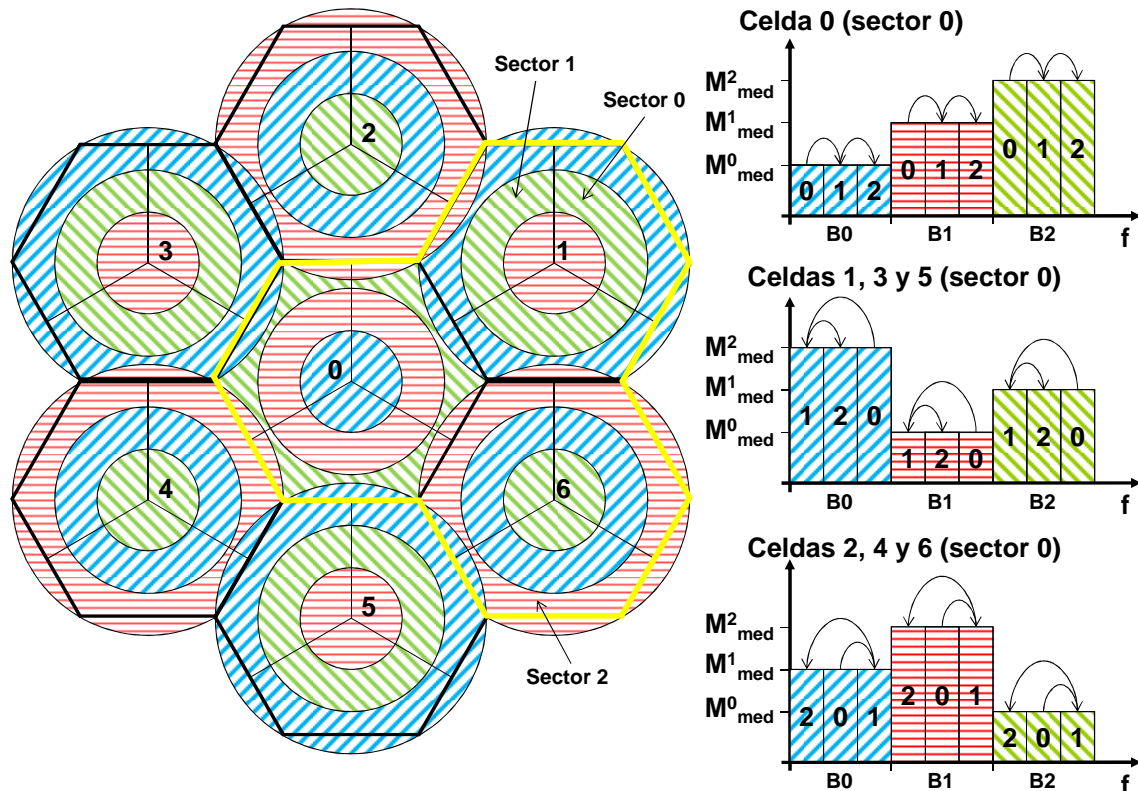


Figura 3.14: Permutación de asignaciones en FFS_3LevelMask_min

La permutación mostrada en la figura anterior solo es verdaderamente eficiente cuando el primer UE asignado en cada nivel de la máscara es el que disfruta de un mayor margen de interferencia. Y del mismo modo, el último de los UEs asignados en cada nivel debe ser el que mayor potencia de transmisión requiera. Los usuarios deberán por tanto ordenarse de acuerdo a su potencia requerida promedio para satisfacer este criterio. El procedimiento que hemos seguido, y que podría aplicarse a cualquiera de los algoritmos descritos anteriormente, pasa por clasificar a los usuarios en L grupos (3 grupos en el caso de FFS_3LevelMask_min) de acuerdo a sus condiciones promedio de canal y una serie de umbrales computados a priori y que pueden actualizarse continuamente dependiendo de las medidas realizadas por los UEs. Los usuarios con buenas condiciones promedio de canal recibirán preferiblemente asignaciones en RBs del nivel más bajo de la máscara, mientras que los UEs con peores condiciones de canal recibirán RBs del nivel más alto. Esta ordenación

pretende por un lado evitar que los usuarios en buenas condiciones ocupen RBs de alta potencia; y por otro, estabilizar la interferencia generada por medio de la agrupación de usuarios con similares condiciones de canal en los mismos RBs.

Los pasos que sigue el algoritmo FFS_3LevelMask_min son muy similares a FFS_3LevelMask, por lo que a continuación nos centraremos únicamente en las diferencias existentes entre ellos:

Paso 1: En este caso, para cada PU $k \in \Gamma_{PU}$ y en orden de prioridad decreciente, asignar RBs considerando la permutación y gestión de potencia descritos anteriormente: los usuarios pertenecientes al primer grupo (los que tienen mayor ganancia de canal) recibirán preferentemente RBs del nivel más bajo de la máscara siguiendo el ordenamiento marcado por la permutación. Si todos los RBs del nivel $l=0$ han sido asignados o bien la asignación no es posible y aún quedan usuarios del primer grupo, se procede a la asignación de RBs a los mismos en el segundo nivel. Los usuarios del segundo grupo recibirán preferentemente asignaciones en el segundo nivel de la máscara, mientras que si no hay suficientes RBs en ella, se intentará asignar RBs a alguno de ellos primero en el nivel más bajo y después en el nivel más alto de la máscara. El objetivo es evitar la ocupación de los RBs de mayor potencia y estabilizar la interferencia asignando a usuarios con similares requisitos de potencia en los mismos RBs. Por último, se intentará asignar RBs a los usuarios del tercer grupo en el último nivel de la máscara y si no hay suficientes RBs para ellos, se intentará asignarles RBs libres de los otros niveles de la máscara.

Paso 2: Al igual que se hiciera FFS_3LevelMask, en este paso se asignan los RBs que queden libres a los PUs que no hayan recibido una asignación aún, pero aplicando el nivel máximo de la máscara de

potencia M_{max} . En este caso vamos a aplicar un orden inverso en la asignación de RBs, es decir, comenzando por los usuarios del tercer grupo puesto que son los que menores probabilidades de recibir una asignación tienen en el paso 1. Con el fin de reducir la interferencia, comenzaremos probando la asignación de recursos a estos usuarios en el nivel más bajo de la máscara para acabar en el nivel más alto. Este mismo procedimiento se aplica después para los usuarios del resto de grupos.

Paso 3: Asignar NPUs en los RBs libres utilizando el nivel medio de la máscara tal y como se hizo en FFS_3LevelMask.

Paso 4: Asignar NPUs en los RBs libres utilizando el nivel máximo de la máscara al igual que en FFS_3LevelMask.

3.2.3 Evaluación de prestaciones

En esta sección se presentan los resultados de simulación que permiten evaluar las prestaciones ofrecidas por los distintos algoritmos de asignación de recursos radio propuestos en condiciones de alta carga.

3.2.3.1 Condiciones de evaluación

Sobre la base del modelo básico de sistema descrito en 3.1.3.1, se presentan a continuación nuevos aspectos tenidos en cuenta en el modelo de simulación para de este modo dotar al sistema de un mayor realismo con respecto a los estudios realizados en el apartado 3.1.3.

Cada celda contiene un número K de usuarios que se desplazan a una velocidad de 3km/h siguiendo una ruta rectilínea. Los usuarios pueden cambiar su dirección de movimiento cada segundo en un ángulo entre $-\pi/2$ y $\pi/2$ elegido aleatoriamente mediante una distribución uniforme. En cada instante de scheduling, un número $M > N_{RB}$ de usuarios se seleccionan aleatoriamente como

usuarios con tráfico activo y los N_p primeros se consideran como usuarios prioritarios (PUs). Al aplicar el modelo full-buffer nos aseguramos que todos los usuarios tienen datos pendientes de transmitir. El número de PUs se ha tomado igual al número de RBs del sistema, es decir, $N_p=N_{RB}=27$. Por tanto, un porcentaje de asignación de PUs del 100% implica que los 27 RBs se han asignado a los 27 PUs en dicho TTI.

Con el fin de obtener una evaluación de las prestaciones ofrecidas por los algoritmos a lo largo del área de cobertura de la celda, se definen tres regiones concéntricas de igual superficie denominadas *zonas*. Las estadísticas de servicio y usuarios se recopilarán independientemente para cada una de estas zonas, denominando por convenio la zona 0 a la más próxima a la BS y zona 2 el borde de la celda.

En la evaluación presentada a continuación se han considerado dos escenarios de simulación en lo que se refiere a la distribución de los usuarios en la celda. Por una parte, se ha definido un escenario de carga homogéneo en el que los usuarios están uniformemente distribuidos entre zonas y sectores. El mismo número de usuarios son elegidos como activos en cada TTI para cada uno de los sectores ($M/3$) y zonas ($M/9$). Sin embargo, puesto que los PUs son seleccionados aleatoriamente de entre los usuarios con tráfico activo en cada TTI, se darán continuamente distribuciones no homogéneas de PUs entre sectores. Los sistemas con sectorización estática no son capaces de adaptarse a estas distribuciones de carga y se producirán situaciones de bloqueo cuando el número de PUs exceda al de RBs en un sector.

El segundo escenario considerado asume una distribución heterogénea de origen entre ciertos sectores del área de simulación. En la Figura 3.15 se muestra gráficamente el escenario considerando, indicando en cada caso el porcentaje de usuarios que existe en cada sector con respecto al total de la celda.

Existe una distribución heterogénea de usuarios entre los sectores de las celdas 0, 4, 5 y 6, pero se ha mantenido una distribución homogénea entre zonas. Esta distribución se ha elegido de tal forma que se generen unas malas condiciones de ICI que permitan analizar el comportamiento y flexibilidad de los algoritmos propuestos, y especialmente de los algoritmos con sectorización adaptativa, en unas condiciones tan desfavorables.

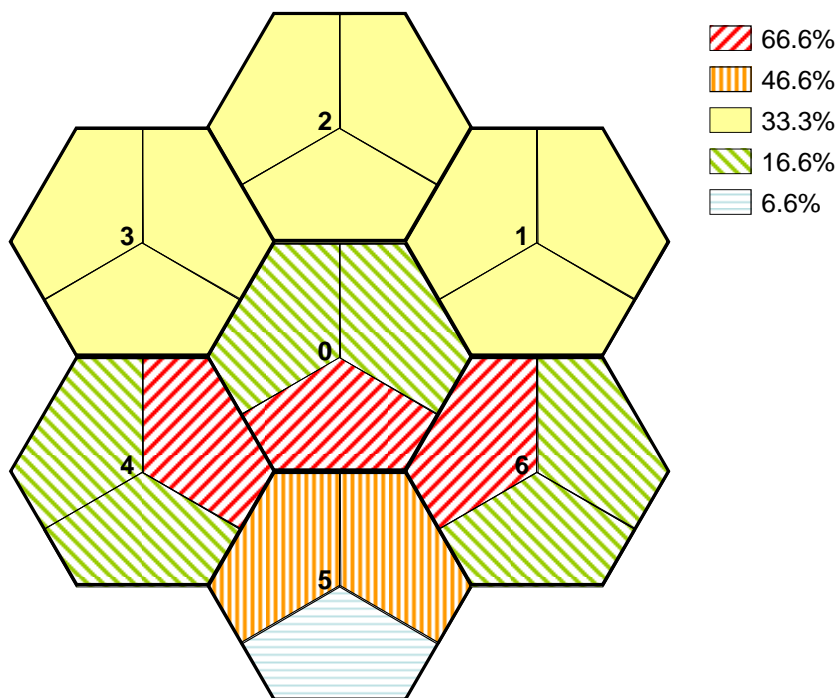


Figura 3.15: Distribución heterogénea de usuarios

A la hora de analizar las prestaciones de los algoritmos de asignación de subportadoras y potencia propuestos, es importante analizar también la equitatividad que proporcionan en cuanto a las oportunidades de asignación dependiendo de la localización de los usuarios. El objetivo de los algoritmos es que estadísticamente, el número de usuarios de cada zona que recibe servicio sea similar, de modo que sea posible ofrecer unas similares garantías de servicio a lo largo de la cobertura de la celda. El porcentaje de PUs de cada zona que recibe una asignación en cada TTI es un indicador directo de la equitatividad que ofrece el algoritmo puesto que refleja su eficiencia para adaptarse a

distribuciones heterogéneas de solicitudes de acceso. Por otro lado, las prestaciones en términos de SINR en cada zona se mostrarán por medio de la función de distribución de probabilidad (*PDF: Probability Density Function*) y de la función de probabilidad acumulativa (*CDF: Cumulative Density Function*) de la SINR promedio recibida en el RB. Además, se mostrarán las estadísticas de la SINR particularizada para el 5-percentil de los usuarios con las peores condiciones de canal. Estas gráficas permitirán estimar con mayor facilidad el porcentaje de usuarios cuya calidad de señal requerida no es satisfecha.

Los algoritmos aquí evaluados no contemplan la adaptación de tasa de acuerdo con el estado de los buffers o del canal, por lo que se asumirá que todos los usuarios tienen los mismos requisitos de tasa y la misma modulación se aplicará en todos ellos. La Tabla 3.8 recopila los valores de SINR requerida para cada modulación con la que se logra una tasa de BLER objetivo del 1%, junto con algunos parámetros de la simulación nuevos añadidos a los de la Tabla 3.3.

Tabla 3.8: Parámetros adicionales de simulación

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>		
Desviación típica del shadowing (σ)	8dB		
Correlación en el shadowing entre celdas	0.5		
Distancia de coherencia del shadowing (d_{cor})	50m		
Ganancia de diversidad en transmisión (G_{Tx})	3dB		
Ganancia de diversidad en recepción (G_{Rx})	3dB		
Usuarios por celda (K)	90		
Velocidad del usuario (v)	3km/h		
SINR requerida	QPSK	16QAM	64QAM
	15dB	23dB	27dB

Los valores de las máscaras de potencia han sido obtenidos desde un punto de vista de la cobertura en la celda, de modo que se ofrezcan similares

condiciones de canal en el límite de cada una de las zonas. Este planteamiento determina los incrementos en potencia que se deben de configurar de un nivel a otro de la máscara. Además, la potencia máxima de transmisión nunca debe excederse independientemente del número de RBs que transmita cada sector. Aplicando estas restricciones se pueden obtener los valores de la máscara media (M_{med}^l), que serán idénticos a los utilizados en la evaluación del apartado 3.1.3.1. Hay que tener en cuenta que para los esquemas basados en sectorización, cada sector recibe inicialmente un tercio de los RBs del sistema ($N_{RB}^s = N_{RB}/3$, $s=0, 1, 2$), que se distribuyen equitativamente entre los L niveles de la máscara de potencia ($N_{RB,l}^s = N_{RB}^s/L$, $l=0, 1, 2$). En el caso de los esquemas basados en sectorización dinámica, donde el número de RBs transmitidos por un sector puede ser mayor debido al robo de RBs, el exceso de potencia necesario será extraído del margen P_{res} , con lo que nunca se excederá el valor de potencia máxima transmitida por sector. Sin embargo, en el caso de FFR_2LevelMask, un sector puede transmitir cualquier RB del sistema debido al esquema soft-FFR implementado, sin que tenga que estar sujeto a un reparto a tercios realizado a priori. Por tanto, la potencia de transmisión del sector debe repartirse entre los $N_{RB} = 27$ RBs del sistema ($N_{RB,0}^s = 2N_{RB}/3$ y $N_{RB,1}^s = N_{RB}/3$). Los valores de las máscaras de potencia para el algoritmo FFR_2LevelMask serán por tanto inferiores comparativamente a los de los sistemas que aplican sectorización. Para los valores de la máscara máxima se ha seguido un criterio simple de incremento de 3dB con respecto a la máscara media, lo que evita que la potencia transmitida en un RB crezca desmesuradamente y lleve al sistema a condiciones inestables. Finalmente, los valores de la máscara mínima se han fijado a 2dB por debajo de la máscara media puesto que este decremento permite reducir la variabilidad de la interferencia al tiempo que permite la creación de un margen de potencia adecuado para asignar usuarios del exterior. Así, los valores finales de las máscaras de potencia para cada algoritmo se muestran en la Tabla 3.9 y en la Tabla 3.10.

Tabla 3.9: Máscaras de potencia para los algoritmos FFS y AFS

Máscara de potencia	$l=0$	$l=1$	$l=2$
M^l_{min} (dBm/RB)*	25.23	30.89	34.21
M^l_{med} (dBm/RB)	27.23	32.89	36.21
M^l_{max} (dBm/RB)	30.23	35.89	39.21

*Solo para *FFS_3LevelMask_min*

Tabla 3.10: Máscaras de potencia para FFR_cell2mask

Máscara de potencia	$l=0$	$l=1$
M^l_{med} (dBm/RB)	27.28	30.56
M^l_{max} (dBm/RB)	30.28	33.56

En lo que respecta al modelado del canal, puesto que en esta evaluación todavía no se considera la correlación temporal en el sistema ya que los usuarios prioritarios se eligen aleatoriamente, el perfil de los desvanecimientos rápidos del canal se generará independientemente para cada TTI. Por otra parte, idealmente se asumirá que la estimación del canal es ideal en lo que respecta a las componentes del canal que permanecen estables durante un periodo largo de tiempo (pérdidas de canal, desvanecimientos lentos y pérdidas de antena). En cuanto a la interferencia, puesto que las asignaciones de RBs y potencia van a variar rápidamente de una subtrama a otra como resultado de los cambios en el canal y en los usuarios considerados como prioritarios, se ha optado por una solución simple que consiste en utilizar el valor de interferencia medido por el usuario en la subtrama anterior para determinar la potencia requerida en la subtrama actual dada una SINR objetivo. Por otra parte, tampoco se han considerado márgenes de potencia adicionales para protegerse de las variaciones de los desvanecimientos rápidos o de la interferencia, ya que no tendrán impacto a efectos de comparación entre algoritmos de asignación.

3.2.3.2 Resultados de simulación

A continuación se detallan los resultados de simulación obtenidos para la comparación de prestaciones de los distintos algoritmos de asignación de RBs y potencia descritos anteriormente. Se mostrarán únicamente los resultados para la modulación 16QAM puesto que las prestaciones obtenidas con QPSK y 64QAM muestran una tendencia similar. Con el fin de llevar a cabo un análisis más profundo de la mejora atribuible a las distintas soluciones contempladas en los algoritmos, se han añadido dos nuevos algoritmos generados como ligeras modificaciones de los anteriores: *AFS_3LevelMask_PO_Min*, que es similar a *AFS_3LevelMask_PO* pero aplicando también la máscara mínima, y *FFS_3LevelMask_Min_NoPerm*, generado a partir de *FFS_3LevelMask_Min* pero sin realizar la permutación en las asignaciones de RBs (los usuarios son agrupados por condiciones de canal pero a la hora de asignar RBs, en todas las celdas se sigue el mismo orden).

Escenario de carga homogénea

En esta primera sección se van a analizar en detalle los algoritmos propuestos bajo el supuesto de un escenario de carga homogénea entre celdas. Recordar que aunque el número de usuarios por zona y sector es igual en todo el despliegue, la selección aleatoria de PUs puede llevar a distribuciones heterogéneas de usuarios prioritarios.

La Tabla 3.11 recoge para el caso de carga homogénea y modulación 16QAM, el porcentaje medio de PUs por subtrama que han recibido una asignación para cada algoritmo de asignación y zona, así como el porcentaje de RBs que no han sido asignados. El algoritmo FFR y AFS, tanto con ordenación de potencia (*AFS_3LevelMask_PO*) como sin ella (*AFS_3LevelMask*), obtienen globalmente los mejores porcentajes. Dado que *FFR_2LevelMask* impone pocas limitaciones a la hora de asignar los recursos, puede adaptarse fácilmente a condiciones no

balanceadas de solicitudes de acceso de PUs entre sectores. Por el contrario, esta relajación de restricciones supondrá una merma en las prestaciones de SINR como se mostrará más adelante, que puede mitigarse en parte cuando se aplica un esquema de sectorización adaptativa.

Tabla 3.11: Porcentajes de acceso con carga homogénea

<i>Algoritmos de asignación</i>	<i>% PUs asignados</i>			<i>% RBs no asignados</i>
	<i>Zona 0</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	
FFS_3LevelMask	93,41	91,00	87,04	0
FFR_2LevelMask	99,96	99,40	98,49	0
AFS_3LevelMask	99,93	98,79	96,14	0,013
AFS_3LevelMask_PO	99,99	99,84	99,25	0
AFS_3LevelMask_PO_Min	99,43	93,32	83,48	0,482
FFS_3LevelMask_Min	98,25	83,09	63,55	0,0002
FFS_3LevelMask_Min_NoPerm	97,81	78,99	59,85	0

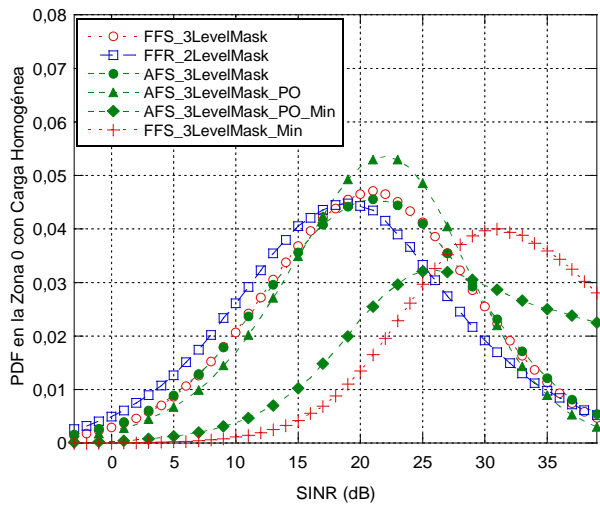
En el extremo opuesto se encuentra el algoritmo FFS_3LevelMask, que proporciona unos porcentajes de acceso pobres, especialmente en la zona 2, dado que utiliza una sectorización frecuencial estricta que acarrea situaciones de bloqueo. Los usuarios de la zona exterior son más sensibles a este bloqueo puesto que el número de RBs en los que pueden recibir recursos es limitado debido a las malas condiciones de canal e interferencia que experimentan. Este problema puede solventarse en buena medida al aplicar algoritmos AFS: la ocupación de RBs de sectores menos cargados resulta efectiva para evitar las situaciones de bloqueo cuando un sector sufre mayor carga. Por otro lado, la ordenación por potencia ofrece un ligero incremento en las tasas de acceso ya que se evita que los usuarios con buenas condiciones de canal ocupen los pocos RBs en los que los usuarios exteriores pueden recibir servicio.

3.2 Control de la ICI y algoritmos de asignación dinámica de potencia y (...)

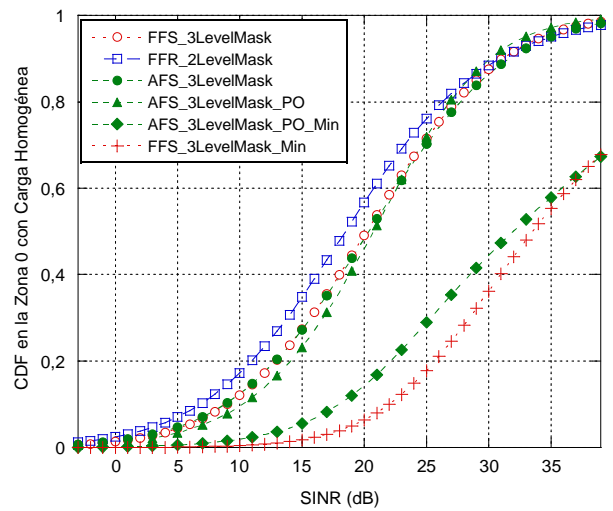
Los porcentajes de acceso indican que el uso de la máscara mínima en AFS_3LevelMask_PO_Min y FFS_3LevelMask_Min reduce significativamente el acceso de los usuarios en la zona 2 con respecto al resto de algoritmos. Esto se debe a que la aplicación de dicha máscara limita enormemente el margen de potencia que puede extraerse de los usuarios en buenas condiciones para incrementar la potencia de transmisión hacia los usuarios exteriores. Del mismo modo, si comparamos las prestaciones del algoritmo FFS_3LevelMask_Min con y sin permutación de asignaciones, observamos que el mejor porcentaje se obtiene cuando se aplica la permutación, pues asegura que el usuario que más potencia requiere en cada subbanda se asigna en posiciones ortogonales entre celdas vecinas. Entonces, la interferencia recibida por estos usuarios se reduce, con lo que la potencia requerida es menor y se consigue un mayor acceso.

Una comparación en términos de porcentajes de acceso exclusivamente no es suficientemente descriptiva para determinar los beneficios de un algoritmo frente a otro. Es importante analizar también la capacidad del algoritmo para asegurar una calidad de señal suficiente como para mantener una comunicación, es decir, asegurar una SINR superior a la SINR umbral de la modulación para una determinada BLER objetivo. Nótese que los errores en la estimación de canal debidos a la variación de los desvanecimientos y de la interferencia hacen más difícil cumplir con los objetivos de SINR, con lo que la estadística de la SINR ofrecida es importante para evaluar las prestaciones de los algoritmos.

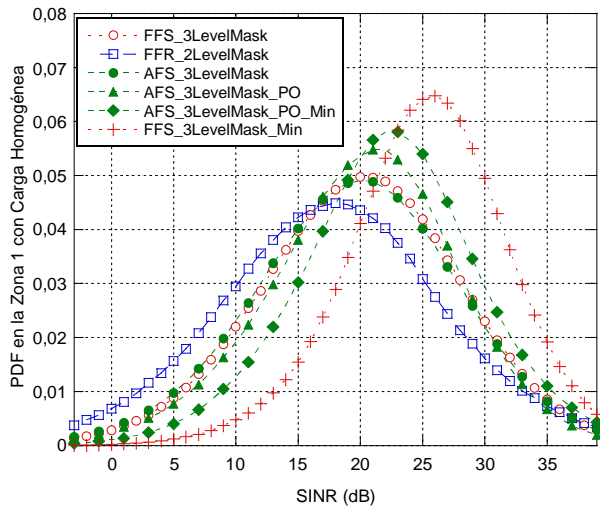
En la Figura 3.16 se muestra la PDF (a) y CDF (b) de la SINR en recepción para cada algoritmo considerado y zona. Puede comprobarse claramente que el esquema con reuso fraccional (FFR_2LevelMask) ofrece peores prestaciones para cada zona debido a las fluctuaciones en la ICI que el propio esquema de reuso introduce. En cambio, los esquemas con sectorización consiguen una SINR mucho más estable en cada zona, mejorándose no solo su valor medio



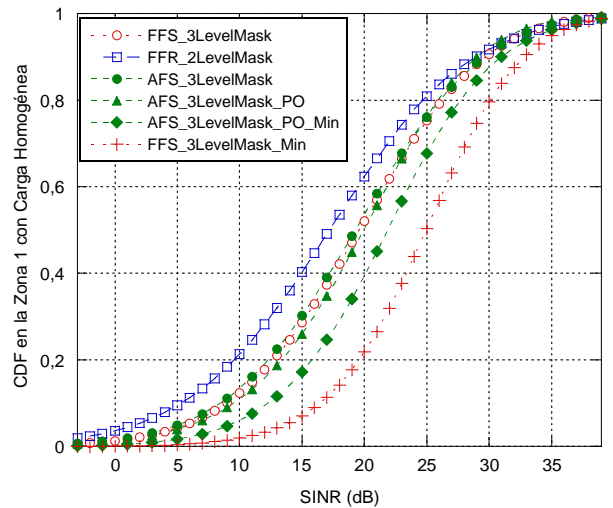
a0) PDF, zona 0



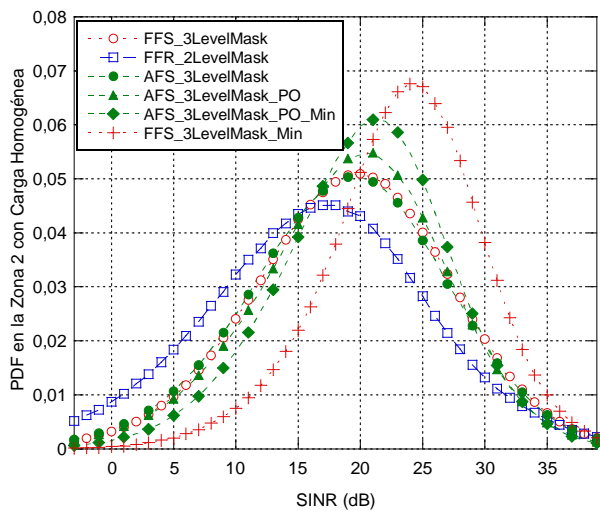
b0) CDF, zona 0



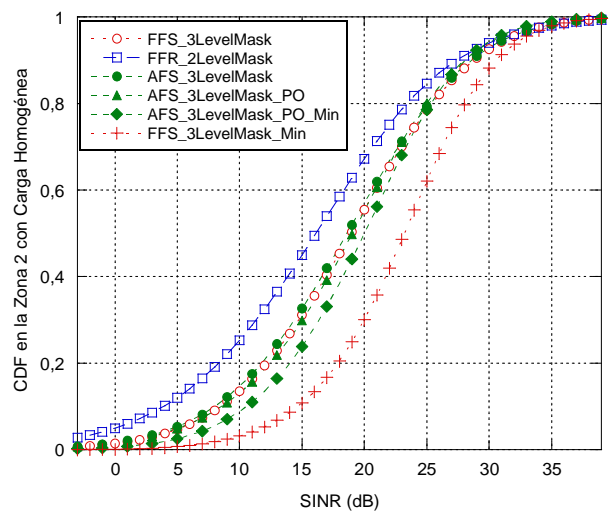
a1) PDF, zona 1



b1) CDF, zona 1



a2) PDF, zona 2



b2) CDF, zona 2

Figura 3.16: PDF (a) y CDF (b) de la SINR en cada zona con carga homogénea

sino también su varianza. Incluso al aplicar el robo de RBs en los algoritmos AFS, las prestaciones en términos de SINR prácticamente no varían frente al algoritmo FFS, y son claramente superiores al esquema FFR. Esto es debido a que se intenta mantener en la medida de lo posible la sectorización frecuencial y en caso de que se necesite robar RBs, estos son asignados a los usuarios que menor potencia de transmisión requieren y, por tanto, generan menos interferencia.

Los algoritmos FFS_3LevelMask_Min y AFS_3LevelMask_PO_Min, que implementan una máscara mínima, obtienen las mejores prestaciones en SINR, y especialmente para la zona 0. Al fijar un valor mínimo a la potencia transmitida en el RB, los usuarios con buenas condiciones de canal disfrutan de un gran margen importante que les permite obtener una SINR más elevada y estable. Sin embargo, el porcentaje de usuarios de la zona exterior que pueden recibir servicio se ve reducido como resultado de que el margen de potencia disminuye. Existe por tanto un compromiso entre accesibilidad y calidad de señal.

En el caso de FFS_3LevelMask_Min, las curvas indican que el algoritmo es capaz de ofrecer la calidad de señal requerida: en la zona 0, el 96% de los usuarios de esta zona reciben una potencia de transmisión igual a la máscara mínima aunque su potencia realmente requerida sea inferior. Este exceso de potencia se podría invertir por ejemplo en mejorar la MCS asignada al usuario para incrementar su tasa. Este aspecto, no considerado en este apartado, va a ser analizado en los capítulos siguientes para diseñar algoritmos de asignación que permitan obtener un aprovechamiento máximo del espectro. Para el resto de zonas, el 50% de los usuarios están por encima de la SINR demandada (23dB), que es el mejor resultado esperable ya que no se aplica ningún margen frente a desvanecimientos ni interferencia y los desvanecimientos Rayleigh no son compensados al asignar la potencia de transmisión.

La Figura 3.17 recoge la PDF (a) y CDF (b) de la SINR recibida por el 5-percentil de los usuarios, es decir, el 5% de los usuarios con peores condiciones de canal e interferencia. Las diferencias entre los distintos algoritmos son menos significativas para estos usuarios aunque como en el global de todos los usuarios, FFR_2LevelMask ofrece una SINR inferior mientras que FFS_3LevelMask_Min proporciona las mejores prestaciones. Para el 5-percentil de peores usuarios se aprecia con mayor claridad que el uso de sectorización adaptativa supone una ligera reducción de la SINR observada (comparar las curvas de AFS_3LevelMask con FFS_3LevelMask). Este empeoramiento no es sin embargo muy significativo (apenas 1dB para el 50% de los peores usuarios), por lo que la ganancia en porcentajes de acceso que se obtiene con AFS justificaría su uso.

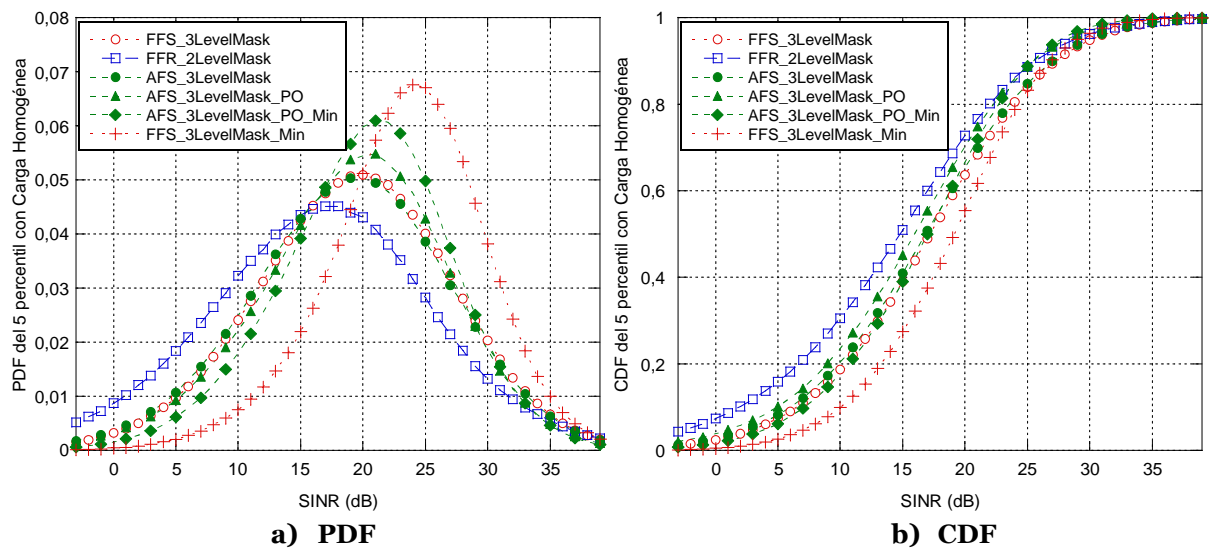


Figura 3.17: PDF (a) y CDF (b) de la SINR para el 5-percentil de peores usuarios

Finalmente, en la Figura 3.18 se analiza la ganancia que supone el uso de permutación en las asignaciones para las tres zonas en FFS_3LevelMask_Min. En la zona 0 se aprecia un empeoramiento de las prestaciones cuando no se aplica permutación puesto que buena parte de los RBs asignados a los usuarios de esta zona son asignados en las celdas vecinas a los usuarios con una mayor potencia requerida, lo que reduce el margen de interferencia de que disfrutan

(recordar que en la mayor parte de los casos, los RBs asignados a los usuarios de la zona 0 se transmiten con una potencia fija igual a la máscara mínima). Sin embargo, en el resto de las zonas, donde el efecto de la máscara mínima se diluye pues muy pocos usuarios pueden recibir servicio con una potencia tan baja, la permutación permite mejorar la SINR en unos 2dB gracias a que los usuarios más interferentes se asignan en RBs ortogonales para celdas contiguas. Cabe destacar de todos modos que la permutación en las asignaciones implica reducir de forma significativa las libertades del scheduler a la hora de elegir los RBs a asignar a los usuarios, por lo podrían producirse situaciones de bloqueo asociadas al orden estricto en que han de asignarse los RBs en este algoritmo.

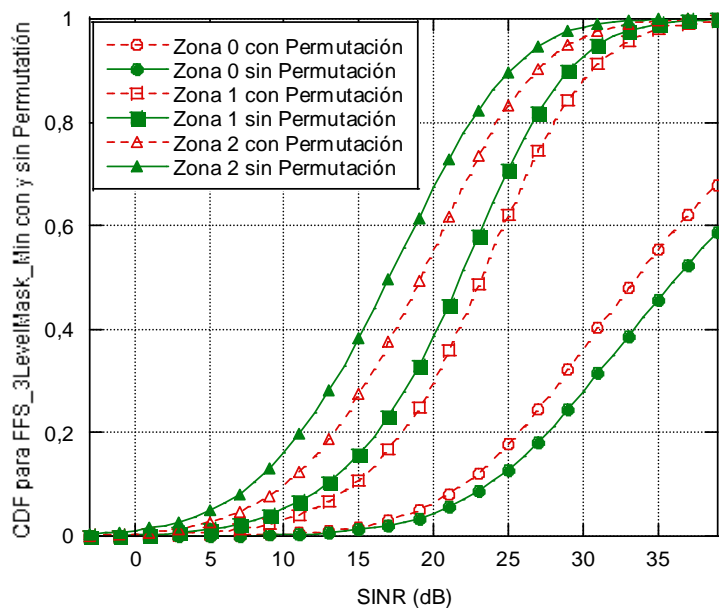


Figura 3.18: CDF de la SINR para FFS_3LevelMask_Min con y sin permutación

Escenario de carga heterogénea

Esta sección recopila los resultados de simulación obtenidos para los algoritmos considerados en el escenario de carga heterogénea de la Figura 3.15. En la Tabla 3.12 se muestran los porcentajes de acceso y el número de RBs asignados para cada algoritmo y sector para el caso de distribución de carga

Tabla 3.12: Porcentajes de acceso con carga heterogénea

<i>Celda</i>	<i>Algoritmos</i>	<i>% PUs asignados</i>			<i>Número medio de RBs asignados</i>		
		<i>s = 0</i>	<i>s = 1</i>	<i>s = 2</i>	<i>s = 0</i>	<i>s = 1</i>	<i>s = 2</i>
0	FFS_3LevelMask	99,92	99,80	49,88	9	9	9
	FFR_2LevelMask	98,48	99,23	98,42	4,48	4,58	17,94
	AFS_3LevelMask	99,89	99,32	94,82	4,51	4,75	17,08
	AFS_3LevelMask_PO	99,00	97,97	98,26	4,54	4,79	17,66
	AFS_3LevelMask_PO_Min	97,22	93,22	87,54	4,96	5,74	15,75
4	FFS_3LevelMask	49,96	99,91	99,82	9	9	9
	FFR_2LevelMask	99,05	99,20	98,12	17,96	4,54	4,50
	AFS_3LevelMask	97,73	99,64	99,76	17,62	4,55	4,69
	AFS_3LevelMask_PO	99,74	99,99	99,89	17,98	4,49	4,52
	AFS_3LevelMask_PO_Min	92,02	99,06	98,90	16,55	4,67	5,29
5	FFS_3LevelMask	71,16	70,81	99,79	9	9	5,24
	FFR_2LevelMask	98,66	98,53	99,50	12,57	12,59	1,84
	AFS_3LevelMask	95,59	94,49	99,99	12,03	11,99	2,75
	AFS_3LevelMask_PO	99,27	98,53	100	12,52	12,40	2,07
	AFS_3LevelMask_PO_Min	90,72	88,88	96,37	11,51	11,31	3,51
6	FFS_3LevelMask	99,94	49,92	99,81	9	9	9
	FFR_2LevelMask	99,41	98,86	99,31	4,52	17,94	4,54
	AFS_3LevelMask	99,76	97,61	99,64	4,59	17,53	4,70
	AFS_3LevelMask_PO	99,99	99,50	99,97	4,51	17,90	4,59
	AFS_3LevelMask_PO_Min	98,61	88,21	98,70	4,74	15,86	5,46

heterogénea entre sectores. Nos centraremos únicamente en las celdas 0, 4, 5 y 6, que son las que sufren una distribución heterogénea. Como era de prever, el algoritmo con sectorización estática (FFS_3LevelMask) provoca bloqueo en los

sectores sobrecargados ya que solo puede asignar 9 RBs debido a la limitación impuesta por la sectorización estática. Por el contrario, los algoritmos basados en reuso fraccional y sectorización adaptativa consiguen adaptarse a esta distribución no homogénea y asignan en media más RBs a los sectores sobrecargados (sombreados en la tabla). Concretamente, FFR_2LevelMask y AFS_3LevelMask_PO son los que proporcionan unos mejores porcentajes globales de acceso, permitiendo asignar prácticamente el 100% de los PUs independientemente de la carga que sufre el sector. Al igual que sucediera en el escenario homogéneo, AFS_3LevelMask_PO_Min ofrece un porcentaje de acceso bajo en la zona exterior como resultado del uso de la máscara mínima. Si prestamos atención al número total de RBs ocupados en cada celda, podemos comprobar que prácticamente siempre se asignan los 27 RBs disponibles, salvo en el caso de FFS_3LevelMask en el sector 2 de la celda 5 (el sector menos cargado del escenario). En promedio solo se asignan 5.24 RBs de los 9 disponibles, dejando 3.76 RBs libres, lo que supone una infrautilización muy clara de los recursos del sistema. Esto es debido a que en este sector, el número de usuarios es 6 y dado que cada usuario solo puede recibir 1 RB, siempre quedarán al menos 3 RBs sin asignar. El resto de RBs sin asignar hasta completar los 3.76 RBs se corresponden con los casos en los que alguno de los usuarios del sector no pudo ser asignado porque lo impedían sus condiciones de canal. En resumen, los algoritmos FFR_2LevelMask y AFS_3LevelMask_PO son los que ofrecen una mejor utilización de los recursos radio disponibles en este escenario homogéneo.

En la Figura 3.19 se muestra la CDF de la SINR en recepción para cada una de las zonas considerando únicamente los usuarios localizados en los sectores con sobrecarga. De este modo se evita el efecto de suavizado que supondría incluir el resto de usuarios del sistema. Las comparaciones relativas entre los distintos algoritmos son similares al caso homogéneo, aunque las diferencias

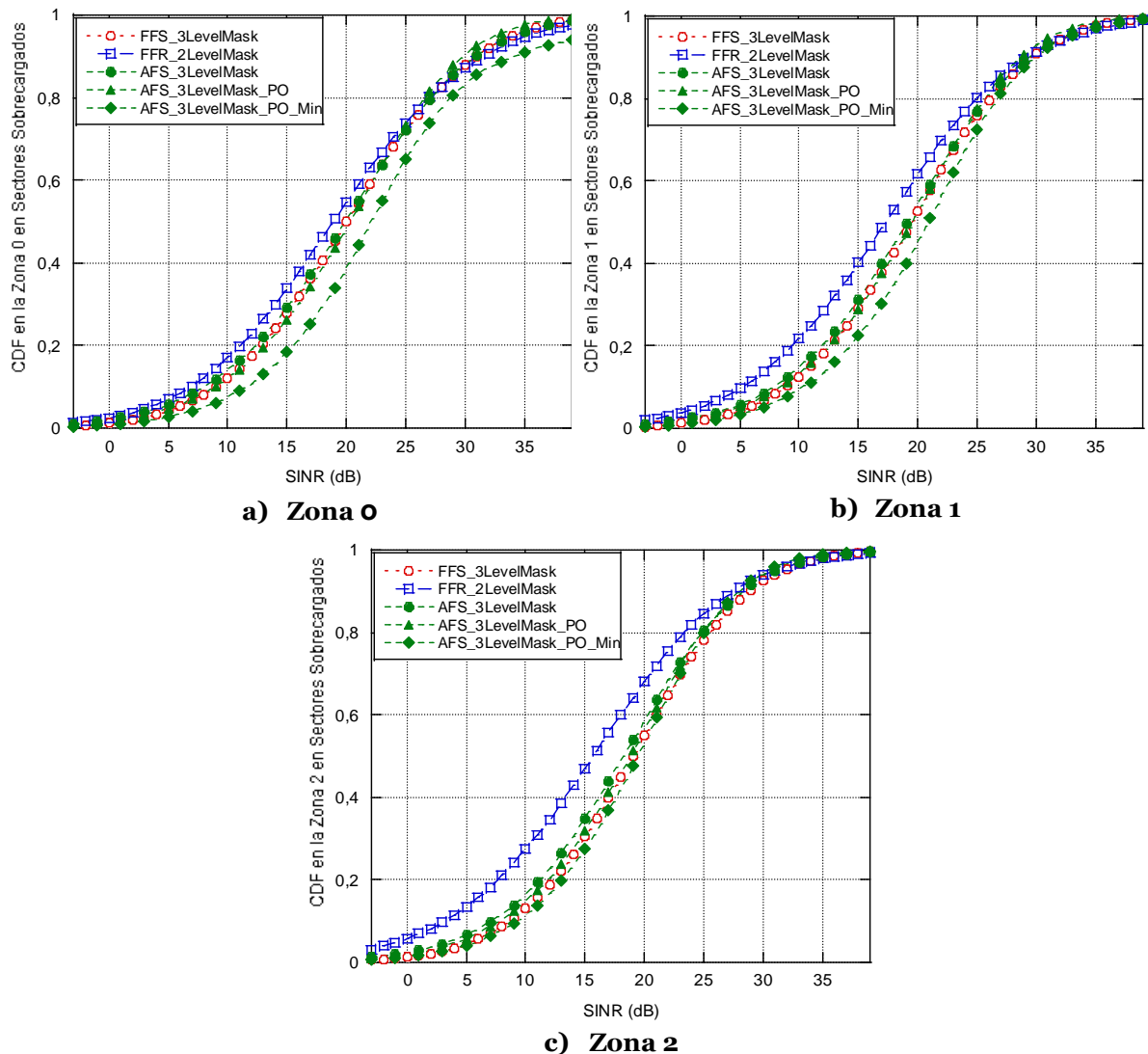


Figura 3.19: CDF de la SINR en cada zona con carga heterogénea

entre ellos son ahora menores. Solo en el caso de AFS_3LevelMask_PO_Min se aprecia un comportamiento claramente diferente en la zona 0 (Figura 3.19a) con respecto al escenario de distribución homogénea (Figura 3.16-b0). Al aumentar la carga de estos sectores, los usuarios de la zona interior de la celda, que son los que utilizan con frecuencia la máscara mínima, pasan a ser asignados en los RBs ocupados de los sectores menos cargados, donde no es posible aplicar dicha máscara. De ahí que la SINR en la zona 0 con AFS_3LevelMask_PO_Min pase a asemejarse al resto de algoritmos. También en este caso de carga heterogénea, AFS_3LevelMask_PO mejora las prestaciones de FFR_2LevelMask en términos

de SINR, puesto que intenta mantener la sectorización siempre que sea posible, lo que reduce la variabilidad de la ICI, y los RBs ocupados a otros sectores se asignan a los usuarios para los que menor potencia de transmisión se requiere.

En resumen, de los resultados de simulación presentados anteriormente puede extraerse que si bien los esquemas con sectorización estática ofrecen una buena calidad de señal en recepción, no son capaces de garantizar una elevada accesibilidad al sistema, y especialmente en condiciones de carga heterogénea. Los algoritmos basados en FFR y AFS resultan por tanto más adecuados ya que permiten una gestión flexible de los recursos frecuenciales, adaptándose a las distribuciones de carga existentes en la celda. Sin embargo, desde un punto de vista de la SINR ofrecida al usuario, los algoritmos basados en AFS resultan más adecuados que el esquema FFR puro debido a que intentan mantener en la medida de lo posible una sectorización en la asignación de RBs, lo que permite estabilizar la ICI y realizar unas asignaciones de recursos más precisas. Además, la sectorización flexible puede incluirse sin problemas como parte integrante de un esquema de coordinación de interferencias más amplio, lo que la hace interesante para el contexto de redes móviles basadas en OFDMA. Por otro lado, los algoritmos con máscara mínima son los que permiten obtener una SINR promedio más próxima a la SINR objetivo de la modulación. Sin embargo, esto supone un impacto en los porcentajes de acceso, y especialmente de los usuarios del exterior, por lo que en caso de aplicarse, deberá considerarse algún modo de mejorar la accesibilidad de dichos usuarios dedicando por ejemplo unos recursos preferiblemente a ellos.

3.3 Comparativa de los mecanismos de control de la ICI y asignación de recursos considerando la evolución temporal del sistema

Los algoritmos de asignación dinámica de subportadoras y potencia descritos en el apartado anterior han sido evaluados de forma preliminar eludiendo la dependencia temporal de la evolución del canal y del tráfico existente en el sistema, lo que ha permitido extraer una serie de conclusiones sobre el comportamiento de los algoritmos que deberán ser refrendadas en un escenario más realista. Por un lado, los desvanecimientos Rayleigh se consideraban incorrelados entre dos subtramas consecutivas, con lo que no podían ser predecibles y no se consideraban en el scheduling a la hora de realizar la asignación de potencia. Sin embargo, en un sistema real, los desvanecimientos Rayleigh presentan correlación temporal porque el canal de propagación no cambia tan rápidamente como para que estén totalmente incorrelados. Los usuarios que se desplazan a poca velocidad experimentan una elevada correlación en los desvanecimientos rápidos puesto que su canal de propagación a la BS no habrá cambiado demasiado. Entonces, el estado futuro de los desvanecimientos Rayleigh podrá estimarse a partir de los valores reportados por el usuario anteriormente a través de los CQIs. Esto permitirá una mayor precisión en la asignación de recursos radio, lo que se traducirá en que el sistema es capaz de garantizar con mayor probabilidad la calidad de enlace requerida por el usuario. Para analizar este hecho, se van a comparar los resultados obtenidos asumiendo esta correlación temporal y dos esquemas de estimación de canal distintos: un estimador ideal, que conoce idealmente el estado del canal en el que se va a realizar la transmisión, y un estimador simple basado en CQIs, que es una solución más cercana a la que se aplica en sistemas reales. En este caso, el retraso entre la medida realizada por el UE y su utilización en el scheduler limitará también la precisión de la estimación de

canal, especialmente para velocidades altas, lo que afectará a las prestaciones ofrecidas por los algoritmos.

Además del estado del canal, otro aspecto que tiene dependencia temporal en el sistema, y que por tanto impactará de forma determinante en las prestaciones ofrecidas, es el tráfico de los usuarios. En la evaluación del apartado anterior se aplicó un modelo simple de tráfico de usuario y scheduling temporal: en cada instante de scheduling todos los UEs tenían paquetes a transmitir en sus buffers y partían con la misma prioridad de asignación, eligiendo aleatoriamente los UEs que se tomaban como prioritarios. Los requerimientos de tráfico se circunscribían a determinar una tasa objetivo por subtrama que debería recibir cada UE, pero no se tomaban en consideración las asignaciones de recursos realizadas en el pasado. Esto implicaba que los usuarios asignados en cada subtrama pudieran cambiar totalmente, lo que se traduce en una gran aleatoriedad en las condiciones de interferencia provocada por los cambios en la potencia transmitida en los RBs. Aunque en un sistema real esta situación también puede darse, la realidad es que los servicios utilizados por los usuarios introducen cierta dependencia temporal puesto que un usuario tendrá normalmente tráfico activo durante varias subtramas seguidas. Dado este hecho, resultaría posible mantener una mayor estabilidad en las asignaciones, reduciendo de esta forma las variaciones en la interferencia.

Por tanto, en lo relativo al modelo de generación de tráfico y gestión de prioridades antes mencionado, se sustituye el modelo full-buffer y de selección aleatoria de prioridad por modelos más realistas de generación y gestión de tráfico que abarcarán también la gestión de retransmisiones a través de mecanismos HARQ. La priorización de usuarios (en principio se asumirá que cada usuario solo tendrá activa una única conexión) se hace para cada conexión, en función de parámetros dependientes del tráfico, pudiendo incluir la consideración de prioridades estáticas y/o dinámicas. Las prioridades estáticas

pueden servir para priorizar un tipo de servicio frente a otro (VoIP frente a servicios nRT). No obstante, esto no excluye la consideración de prioridades dinámicas (asignadas a nivel de paquete dentro de la misma conexión), dependientes de los parámetros de tráfico del servicio y del grado de satisfacción de los parámetros de calidad de servicio (retardo, throughput promedio, etc.). En cualquier caso, al aplicar una estrategia de scheduling temporal dependiente de los parámetros de QoS de los usuarios, se producen cambios en la distribución de solicitudes de acceso dentro del área de cobertura de la celda frente al caso de prioridad aleatoria aplicado en el escenario anterior. Por ejemplo, en el caso de servicios en tiempo real donde los paquetes tienen requisitos máximos de retardo, el scheduler debe priorizar la asignación de aquellas conexiones con mayor retraso, que generalmente pertenecen a los usuarios del exterior de la celda puesto que experimentan unas peores condiciones de canal. Será tarea del algoritmo de asignación de recurso radio realizar la asignación más eficiente posible de los recursos existentes al tiempo que se proporciona una calidad de señal adecuada a lo largo de la celda como para que el servicio pueda ser equitativo en el área de cobertura de la misma.

El objetivo de este apartado es por tanto mostrar los resultados de simulación de los algoritmos de asignación de RBs y potencia descritos en el apartado 3.2 cuando se aplica un modelo completo del sistema, es decir, considerando el impacto de la estimación del canal y de la evolución temporal de la demanda de tráfico de los usuarios. No entra dentro de los objetivos del apartado el evaluar propuestas específicas de algoritmos de scheduling temporal. Por este motivo, se supondrá un algoritmo de scheduling temporal simple cuyo objetivo es lograr una tasa promedio por usuario similar a lo largo de toda la celda.

En concreto, los cinco algoritmos de asignación de recursos radio que vamos a analizar son:

- *FFS_3LevelMask*: Sectorización con máscaras de potencia a nivel de celda.
- *FFR_2LevelMask*: Reúso fraccional.
- *AFS_3LevelMask*: Sectorización adaptativa con robo de RBs y máscaras de potencia.
- *AFS_3LevelMask_PO*: Sectorización adaptativa con robo de RBs, máscaras de potencia y priorización de usuarios por condiciones de canal.
- *FFS_3LevelMask_Min*: Sectorización con máscara mínima.

3.3.1 Condiciones de simulación

El modelo de sistema considerado en este apartado parte del utilizado en las simulaciones anteriores pero añade algunos aspectos importantes que capturan la dependencia temporal existente en los sistemas reales.

3.3.1.1 Modelado de tráfico

Para analizar las prestaciones ofrecidas por los algoritmos de control de ICI y asignación de recursos radio, se va a considerar un tráfico a ráfagas típico. Sin pérdida de generalidad, vamos a asumir como en el apartado anterior que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos entre BS y UE en el enlace descendente. Las conexiones se componen de dos elementos fundamentalmente:

- *Fuente generadora de paquetes*: de acuerdo con el modelo de tráfico considerado en la conexión, cada cierto tiempo se generarán nuevos paquetes de datos con un tamaño determinado que serán añadidos al buffer de la conexión a la espera de ser transmitidos.
- *Buffers de transmisión*: cada conexión entre BS y UE dispone de dos buffers independientes: el *buffer de salida*, que almacena los nuevos paquetes generados pendientes de ser transmitidos, y el *buffer de ARQ*,

donde se guardan los bloques de datos que deben ser retransmitidos debido a que fueron recibidos erróneamente por el usuario. Por norma general, el buffer de ARQ tiene mayor prioridad a la hora de sacar paquetes, puesto que el retardo acumulado por ellos es mayor. El tiempo máximo que un paquete puede permanecer en los buffers de la conexión k ($D_{max,k}$) es un parámetro dependiente del tipo de servicio considerado.

En concreto, para este apartado, y ya en adelante para el resto de esta tesis, se va a considerar un modelo de tráfico a ráfagas, siguiendo un proceso de tipo ON-OFF. Durante el periodo ON, la fuente genera un nuevo paquete por subtrama de longitud L bits, que será añadido al buffer de salida. La duración de los periodos ON y OFF se modela mediante una variable aleatoria exponencial de media T_{ON} y T_{OFF} respectivamente. El factor de actividad de la fuente (α) define la relación entre ambos periodos, de acuerdo con la expresión (3.16). Los valores concretos para el modelo de tráfico utilizados en las simulaciones mostradas en este apartado se muestran en la Tabla 3.13.

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (3.16)$$

Tabla 3.13: Parámetros del modelo de tráfico

Parámetro	Valor
T_{ON}	30 subtramas
T_{OFF}	90 subtramas
α	1/4
$D_{max,k}$	50 subtramas

El tipo de servicio considerado en las simulaciones está limitado por retardo, es decir, que cuando un paquete lleva en los buffers de la conexión $D_{max,k}$ subtramas, es eliminado. En estas primeras simulaciones se ha considerado por simplicidad que el servicio no requiere retransmisiones, por lo que no se precisa de un buffer de ARQ.

Con el fin de obtener unas condiciones de simulación análogas a las del apartado anterior, vamos a suponer que el sistema se encuentra en un estado de elevada carga, donde prácticamente en todas las subtramas se asignan los $n_{RB}=27$ RBs de que dispone cada celda. Dado que en media, el factor de actividad del tráfico es $\alpha=1/4$, el número de usuarios que hay que considerar en cada celda es $N_{UES}=27/(1/4)=108$ usuarios. Se considerará una distribución homogénea de usuarios de modo que existe el mismo número medio de usuarios en cada sector y zona.

3.3.1.2 Scheduling temporal

Sin pérdida de generalidad, vamos a asumir en las siguientes simulaciones que cuando una conexión recibe la asignación de un RB, se transmite un paquete de datos completo de tamaño L bits, que es el mismo tamaño de los paquetes generados en cada TTI del periodo activo del tráfico. Esto implica que si cada conexión recibiera un RB en cada TTI de su periodo activo, los tráficos no acumularían retrasos. Podemos hablar por tanto de un requisito de *tasa de satisfacción* ($T_{sat,k}$) de L bits/TTI. Sin embargo, en condiciones de carga media-alta, no es posible garantizar asignaciones a todas las conexiones en cada TTI, con lo que los flujos empiezan a acumular retrasos y es cuando los esquemas de scheduling temporal cobran especial relevancia.

La priorización de las distintas conexiones se puede realizar en función de diferentes criterios, como se ha detallado en el capítulo 2. Las simulaciones mostradas a continuación utilizan un modelo simple para la priorización de las conexiones basada en la tasa promedio servida al usuario: en cada TTI, el scheduler temporal asigna un índice de prioridad a cada conexión que viene determinado por el grado de cumplimiento de los parámetros de QoS de sus conexiones. En concreto, se ha aplicado el criterio denominado “Tasa” (ecuación (3.17)), que se define como el cociente entre la tasa promedio recibida por la conexión hasta el TTI n -ésimo ($T_k[n]$) y su requisito de satisfacción de tasa

$(T_{sat,k})$. La tasa promedio recibida por la conexión se actualiza de forma recursiva cada TTI como se muestra en la ecuación (3.18), donde t_c es la ventana de promediado y r_k es la tasa asignada a la conexión en el TTI (n-1)-ésimo.

$$k^* = \arg \min_k \frac{T_k[n]}{T_{sat,k}} \quad (3.17)$$

$$T_k[n] = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k[n-1] + \frac{1}{t_c} r_k[n-1] \quad (3.18)$$

Con el criterio de tasa, aquellos usuarios que hayan satisfecho en menor medida sus requisitos de tasa tendrán mayor prioridad de asignación en ese TTI. Una vez fijada la prioridad de cada conexión de datos, se produce una reordenación de las mismas de acuerdo a su índice de prioridad y a continuación se realizará la asignación de subportadoras y potencia como se describió en el capítulo 3 para cada algoritmo considerado.

3.3.1.3 Evolución temporal del canal

Como ya se ha comentado anteriormente, las simulaciones mostradas a continuación contemplan de forma explícita la dependencia temporal existente en el canal de transmisión debido a la correlación de los desvanecimientos Rayleigh en función de la velocidad de desplazamiento del usuario. Para modelar dicha correlación, se ha utilizado el modelo clásico de Jakes (como se apuntó en el apartado 3.1.3.1), en el que la potencia de cada rayo que compone el canal se modifica en cada subtrama de acuerdo con la velocidad del usuario: cuando la velocidad de desplazamiento es baja, el perfil de desvanecimientos Rayleigh varía muy lentamente y será posible estimar con precisión el estado futuro del mismo en base a las medidas proporcionadas por los usuario. Sin embargo, para velocidades de desplazamiento elevadas, el canal varía rápidamente y no es posible seguir con precisión la evolución del mismo. Esto supone que en un mayor número de ocasiones, el algoritmo de asignación no

será capaz de garantizar la SINR deseada por el usuario. Para analizar este efecto, se han realizado dos baterías de simulación considerando en un caso una velocidad de desplazamiento de 3km/h, mientras que en el otro, los usuarios se desplazarán a 120km/h.

En cuanto al mecanismo de estimación y reporte del estado del canal, se van a explorar dos alternativas:

- *Estimación ideal del canal:* como en el apartado anterior, las pérdidas estables del canal (desvanecimientos lentos, pérdidas de propagación y pérdidas de antena) son estimadas idealmente por el scheduler. Además, dado que se toma ahora en consideración la evolución del canal, vamos a asumir que los desvanecimientos Rayleigh también pueden ser estimados idealmente, de modo que en la asignación de subportadoras y potencia se utilizan las pérdidas totales que va sufrir la señal al atravesar el canal hacia el usuario. El valor de la interferencia considerado a la hora de estimar la SINR ofrecida es el de la subtrama anterior. Este es el mismo esquema de estimación de canal que se aplicó en el apartado anterior. Aunque este estimador también supone una idealización importante del sistema, nos servirá como referencia para ver con claridad el impacto en las prestaciones que supone que exista un retardo entre la realización de la medida de calidad del canal y su uso en el scheduler.
- *Estimación de canal basada en el CQI de la subtrama anterior:* la determinación de la potencia requerida se realizará en base a los valores medidos por el usuario en la subtrama anterior, tanto para el canal como para la interferencia, por lo que existe un retardo de una subtrama entre la medida del estado del canal y su uso en el scheduling. Aunque en un sistema real no es posible asumir que el scheduler dispondrá en un momento dado de la medida de calidad del enlace realizada por el usuario inmediatamente, nos ayudará sin embargo a mostrar cómo, incluso con una sola subtrama de retraso entre la medida del canal y su

uso en el scheduling, las prestaciones se ven degradadas y especialmente para velocidades de desplazamiento altas.

3.3.2 Resultados de las simulaciones

En esta sección se van a presentar los resultados de simulación obtenidos para los 5 algoritmos de control de ICI y asignación de recursos considerados considerando la evolución temporal del sistema. Para comparar la capacidad de los distintos algoritmos de cursar el tráfico solicitado por los usuarios, utilizaremos como métrica el porcentaje de satisfacción, es decir, el porcentaje de subtramas en las que una conexión recibe una asignación de recursos frente al total de subtramas en las que tenía algún paquete en sus buffers. Ya no se hablará por tanto de usuarios prioritarios o no prioritarios, sino de usuarios con tráfico pendiente, cuya prioridad relativa viene dada por la estrategia de scheduling temporal seleccionada. La capacidad del algoritmo para asegurar la suficiente calidad del canal se analizará por medio de la SINR promedio ofrecida al usuario en el RB asignado. El objetivo de esta evaluación no es analizar la QoS realmente ofrecida a los usuarios sino estudiar con un mayor detalle la capacidad de los algoritmos de asignación propuestos para garantizar la accesibilidad y calidad de señal requerida. No se analizará por tanto el efecto de las retransmisiones de paquetes cuando fueron recibidos erróneamente. Las conclusiones extraídas del análisis aquí presentado se utilizarán para definir en los capítulos posteriores algoritmos de scheduling completos cuyo objetivo sea la provisión de QoS y control de la interferencia en redes OFDMA.

En primer lugar, en este apartado se analizarán las prestaciones obtenidas para una velocidad de desplazamiento de los usuarios de 3km/h, donde se comprobará que el comportamiento es similar con ambos estimadores. Posteriormente se presentan los resultados para una velocidad de 120km/h,

valor para el que se apreciará una degradación al utilizar el estimador por CQIs debido a la antigüedad de la medida del canal y a los cambios rápidos del mismo.

3.3.2.1 Velocidad de desplazamiento de los usuarios de 3km/h

La Tabla 3.14 recopila los porcentajes de asignación para cada algoritmo y zona. Los valores son similares cuando se considera estimación ideal o CQI anterior. En estas condiciones de evaluación, se aprecia que FFR_2LevelMask ofrece los mejores porcentajes de asignación para ambos estimadores, estando siempre por encima del 96% gracias a las pocas restricciones que impone en la asignación de recursos. El caso opuesto lo representa FFS_3LevelMask_Min, que ofrece unos porcentajes de acceso bajos en las zonas 1 y 2 como resultado de la reducción en el margen de potencia debida a la máscara mínima. En general, los algoritmos basados en sectorización, incluso aquellos que aplican sectorización adaptativa, no son capaces de ofrecer suficiente flexibilidad en la asignación y penalizan el acceso de todos los usuarios, y en especial el de los usuarios situados en el exterior de la celda. Esto se debe fundamentalmente a que los usuarios del exterior tienen más difícil satisfacer sus requisitos de SINR necesarios para el esquema de MCS propuesto debido a sus peores condiciones de canal. Los algoritmos AFS, aunque permiten incrementar los RBs disponibles en los sectores más cargados, estos se asignan a los usuarios con una potencia de transmisión menor, con lo que no podrán ser ocupados generalmente por los usuarios exteriores. En el caso de FFR, puesto que se aplican mínimas restricciones en cuanto a la asignación de recursos, se obtienen unos porcentajes de acceso muy buenos para ambos esquemas de estimación de canal. Por tanto, podemos concluir que a efectos de porcentajes de acceso, la solución FFR resulta más adecuada que AFS puesto que permite mejorar el acceso de los usuarios exteriores.

Tabla 3.14: Porcentajes de asignación para cada algoritmo a 3km/h

<i>Algoritmos</i>	<i>Estimación ideal</i>			<i>CQI anterior</i>		
	<i>Zona 0</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	<i>Zona 0</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>
FFS_3LevelMask	97,20	91,82	85,74	97,98	88,65	81,27
FFR_2LevelMask	95,95	95,94	95,96	96,09	96,08	96,07
AFS_3LevelMask	97,72	86,60	78,85	98,16	88,45	81,31
AFS_3LevelMask_PO	94,76	91,87	80,44	92,66	94,94	88,14
FFS_3LevelMask_Min	95,13	69,48	50,08	96,96	79,57	60,24

De acuerdo con los valores de acceso mostrados en la tabla anterior para las zonas 0 y 1, cabe plantearse el beneficio real que reporta utilizar dos niveles distintos de potencia en la máscara para dichas zonas: en todos los algoritmos con máscaras de tres niveles se aprecia que el porcentaje de acceso de la zona 1 es claramente inferior al de la zona 0 a pesar de que se presupuesta una mayor potencia de transmisión. Sin embargo, en el caso de FFR, que tiene un único nivel de potencia para toda la zona interior de la celda, se aprecian unos porcentajes de acceso similares en ambas zonas. Esto parece indicar que las restricciones en la asignación de recursos que implica este nivel adicional no se traducen en una mejora en la accesibilidad, sino todo lo contrario. A una conclusión similar se llega en [González y otros, 2010], donde se demuestra que definir más niveles de potencia no proporciona ninguna mejora significativa con respecto a una máscara de solo dos niveles, debido fundamentalmente a las restricciones adicionales que se imponen al scheduler. Por tanto, en el diseño de algoritmos que se realizará en los capítulos siguientes se va a asumir como premisa que las máscaras de potencia utilizan un único nivel de potencia para cubrir las dos zonas interiores de la celda.

La Figura 3.20 muestra de forma comparada la PDF de la SINR recibida para las tres zonas de la celda considerando la evolución temporal del canal y del tráfico en el sistema. Las simulaciones realizadas consideraban una transmisión

con 16QAM, que requiere una SINR promedio de 23dB para obtener la tasa de error objetivo. Los resultados obtenidos para ambos esquemas de estimación de canal son similares, debido a que los usuarios se desplazan a una velocidad muy baja. Los desvanecimientos Rayleigh varían entonces muy lentamente, con lo que el canal presenta una elevada correlación temporal entre dos subtramas consecutivas y ambos esquemas consiguen una estimación del canal similar. La variabilidad en la SINR en recepción viene dada en su mayor parte por la variación impredecible de la interferencia entre dos subtramas consecutivas. En el caso de FFR_2LevelMask se aprecia una mayor dispersión en la SINR que para el resto de algoritmos. La libertad en la asignación de recursos frecuenciales que proporciona el esquema de reuso fraccional conlleva una mayor variabilidad en la interferencia, que se refleja en una mayor dispersión en la SINR recibida. Por lo tanto, queda contrastado que también en este escenario con dependencia temporal, FFR_2LevelMask proporciona unos porcentajes de acceso muy altos a costa de un empeoramiento en las prestaciones de SINR, que se traducirían en un incremento del BLER en caso de contabilizarse. Por el contrario, los algoritmos basados en sectorización obtienen unas prestaciones en términos de SINR sensiblemente mejores, logrando unas curvas PDF centradas en el valor de SINR objetivo de 23dB. En líneas generales, los resultados obtenidos sugieren la conveniencia de buscar esquemas que combinen la flexibilidad de FFR_2LevelMask con la ordenación en la asignación de recursos propia de los algoritmos AFS ya que es capaz de obtener unas prestaciones de SINR adecuadas. Comparando estos resultados con los mostrados en la Figura 3.16 (donde la estimación de canal ideal no incluía el Rayleigh), se puede apreciar que la SINR obtenida en recepción presenta menor dispersión puesto que el sistema ahora presenta dependencia temporal tanto en el estado del canal como en el tráfico.

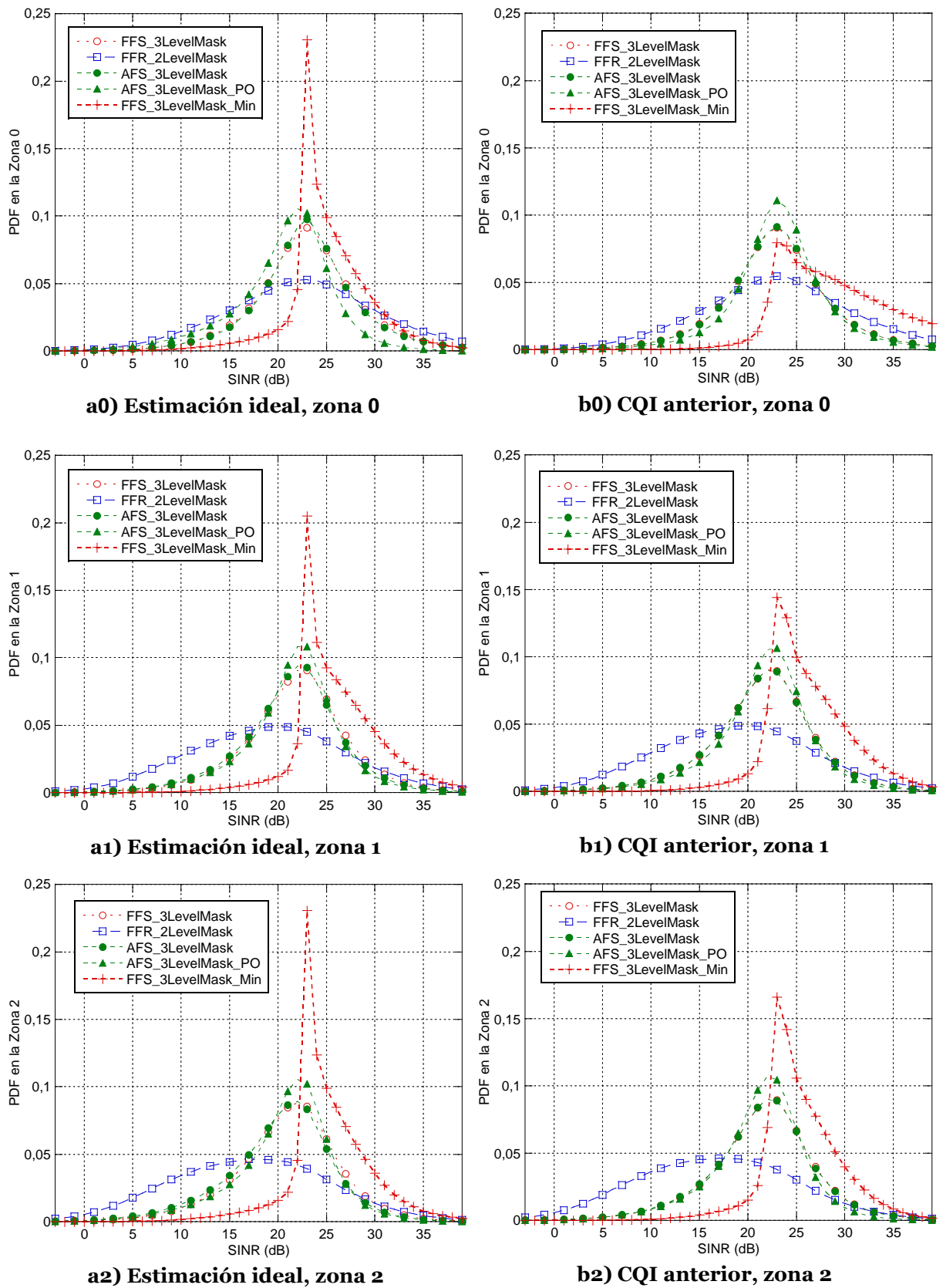


Figura 3.20: Comparación de la PDF de la SINR para 3km/h

Resulta interesante analizar en detalle el comportamiento mostrado por FFS_3LevelMask_Min en cuanto a la SINR. La forma de la PDF deja de tener una apariencia gaussiana para presentar un aumento rápido en torno a los 23dB y una caída más lenta para valores de SINR superiores. Este comportamiento tan distinto al resto de algoritmos se debe a la presencia de la máscara mínima. En la Figura 3.21 se ha desglosado la PDF global de la SINR recibida en la zona 2 en dos curvas distintas: en azul se presenta la PDF de la SINR recibida por aquellos UEs cuya potencia de transmisión está fijada en la máscara mínima, mientras que en verde se representa la contribución debida a aquellos UEs con peores condiciones de canal y cuya potencia de transmisión es ajustada dinámicamente para obtener la SINR umbral de la modulación. Claramente se aprecia que los usuarios con potencia adaptada obtienen en promedio la SINR umbral, con ligeras variaciones a ambos lados debidas a la variabilidad de la interferencia. Estas variaciones resultan de todos modos muy escasas gracias a la estabilidad en la potencia de transmisión que ofrece este algoritmo. Por otro lado, los usuarios cuya potencia de transmisión se fija a la máscara mínima, obtienen unos valores de SINR superiores, dado que su potencia de transmisión no se ajusta de acuerdo a las condiciones de canal, disfrutando de un margen de interferencia elevado y que podría aprovecharse para incrementar su MCS en caso de que esta opción se contemplara en el algoritmo. Comparando los resultados cuando se utiliza estimador ideal o basado en CQIs se observa una mayor dispersión en la curva correspondiente a los usuarios con potencia adaptada (en verde), lo que es debido al retardo de una subtrama existente entre la realización de la medida y su uso en el scheduler. Sin embargo, este empeoramiento en las prestaciones es muy limitado, lo que confirma a este esquema de asignación de potencia como un posible candidato para ser aplicado en el diseño de algoritmos de asignación más robustos como los presentados en los capítulos siguientes. No obstante, los porcentajes de accesibilidad ofrecidos por este algoritmo son bajos comparados con la versión sin máscara mínima.

Sin embargo, dado que la SINR es muy alta en todas las zonas, es esperable que la tasa de BLER sea extremadamente baja y no se precisen prácticamente retransmisiones de paquetes, equilibrándose las prestaciones con las del resto de algoritmos en términos de servicio ofrecido al usuario.

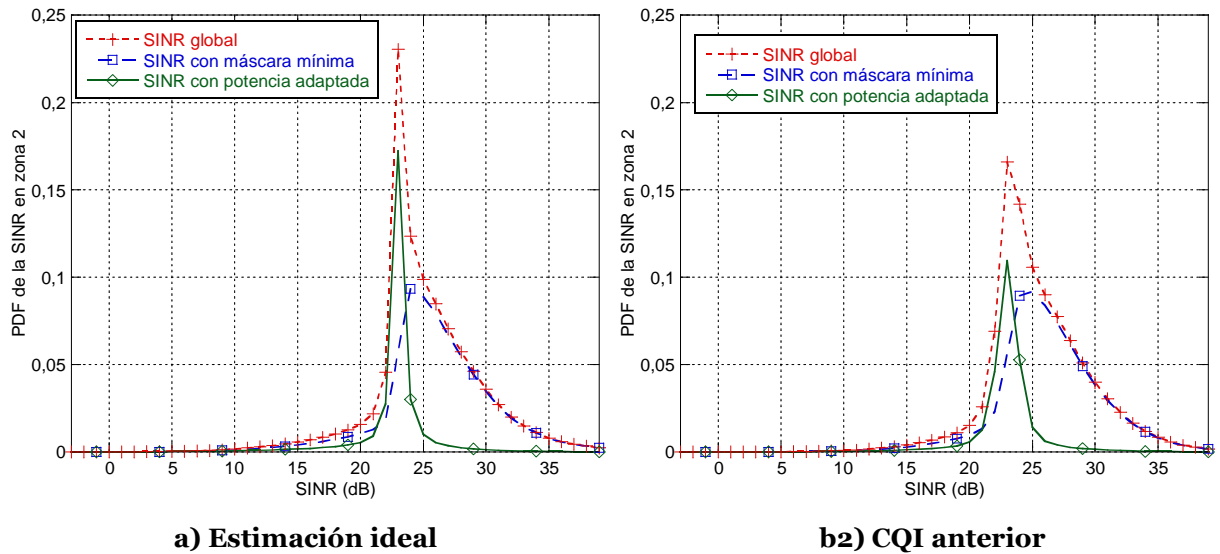


Figura 3.21: Desglose de la SINR para FFS_3LevelMask_Min en la zona 2

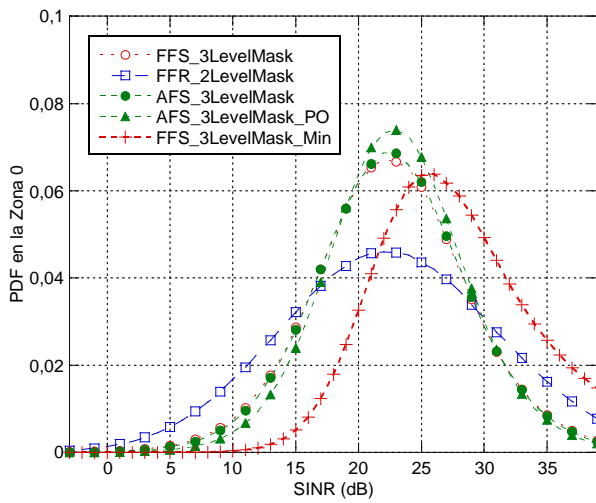
3.3.2.2 Velocidad de desplazamiento de los usuarios de 120km/h

La Tabla 3.15 recoge los porcentajes de acceso para los cinco algoritmos analizados cuando los usuarios se desplazan a 120km/h. Los valores no presentan grandes diferencias comparativas con respecto a los mostrados para 3km/h puesto que al no considerar las retransmisiones de paquetes erróneos, la velocidad del usuario no tiene impacto en la distribución de solicitudes de acceso y de ahí que los porcentajes se mantengan en valores similares. Como en el caso anterior, el algoritmo basado en FFR es el que mejores porcentajes obtiene mientras que los algoritmos con sectorización estática proporcionan los porcentajes más bajos especialmente en la zona exterior.

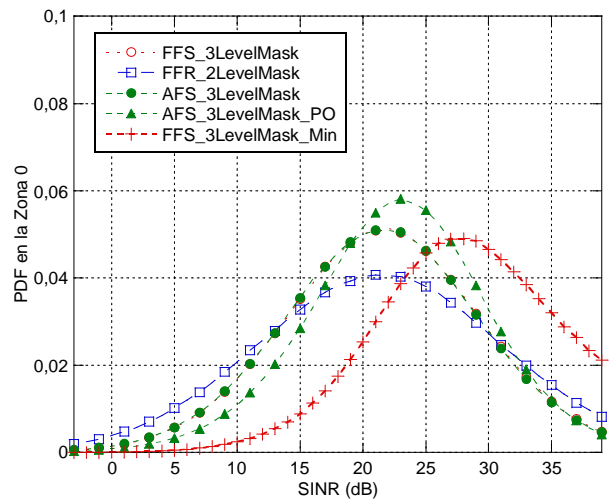
Tabla 3.15: Porcentajes de asignación para cada algoritmo a 120km/h

<i>Algoritmos</i>	<i>Estimación ideal</i>			<i>CQI anterior</i>		
	<i>Zona 0</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	<i>Zona 0</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>
FFS_3LevelMask	98,02	91,30	83,87	97,85	92,01	85,97
FFR_2LevelMask	95,95	96,21	96,33	96,11	96,11	96,11
AFS_3LevelMask	98,42	92,31	85,49	98,68	91,66	85,57
AFS_3LevelMask_PO	92,71	95,98	88,53	93,23	95,34	86,45
FFS_3LevelMask_Min	97,99	81,63	60,69	97,73	79,59	60,77

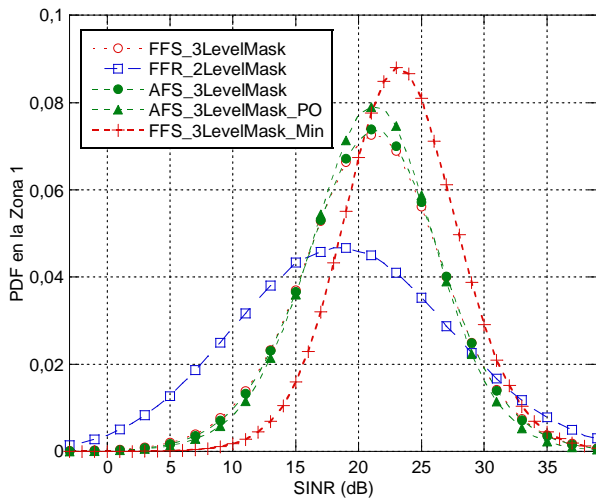
El impacto de la velocidad de desplazamiento se ve con mayor claridad en la SINR ofrecida al usuario (Figura 3.22). A diferencia de lo que ocurre con 3km/h, cuando el terminal se desplaza a 120km/h el canal varía de forma considerable de una subtrama a la siguiente. Al comparar los resultados con estimación ideal de canal y considerando el CQI de la subtrama anterior, sí se aprecian diferencias notables entre ellos. Al utilizar estimación ideal de canal, el efecto de la velocidad de desplazamiento se traduce en un ligero incremento de la dispersión de la SINR con respecto al caso de 3km/h. Esto es debido a que el presupuesto de potencia ya se realiza compensando el Rayleigh, pero la interferencia no se puede predecir y se tomaba el valor de la subtrama anterior. Dado que la interferencia se compone en esencia de varias contribuciones que atraviesan canales radio más variables por la velocidad de desplazamiento, la estadística de la interferencia presentará por tanto mayor varianza, lo que se traduce en un aumento de la dispersión de la SINR. En el caso de utilizar el CQI de la subtrama anterior, a la dispersión de la interferencia hay que añadir la debida al canal radio de la señal útil, puesto que en este caso no se estima idealmente sino a través del CQI de la subtrama anterior. La estimación del Rayleigh realizada en una subtrama prácticamente no es válida para la subtrama siguiente debido a la elevada velocidad de desplazamiento del usuario.



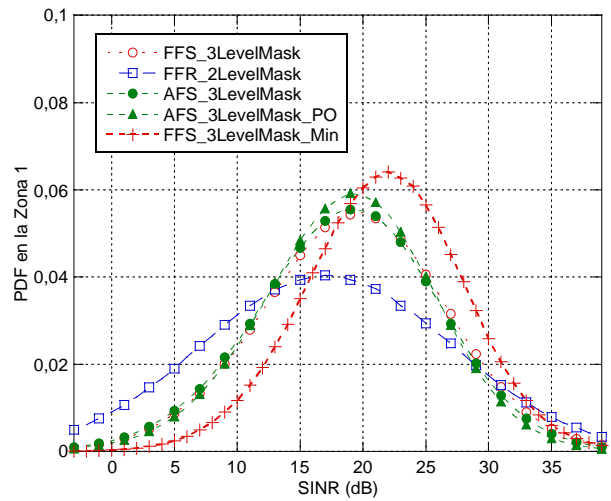
a0) Estimación ideal, zona 0



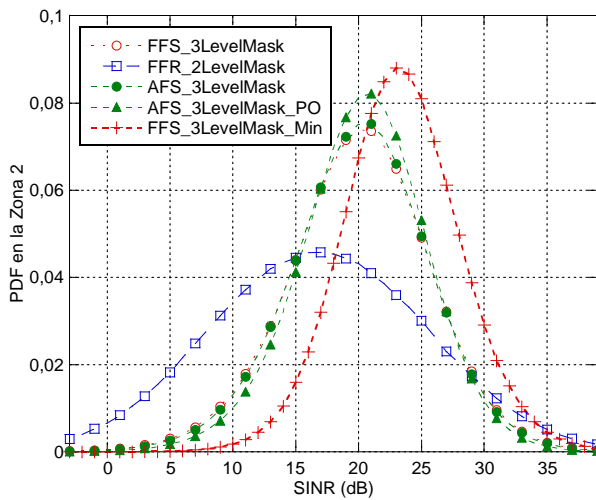
a1) CQI anterior, zona 0



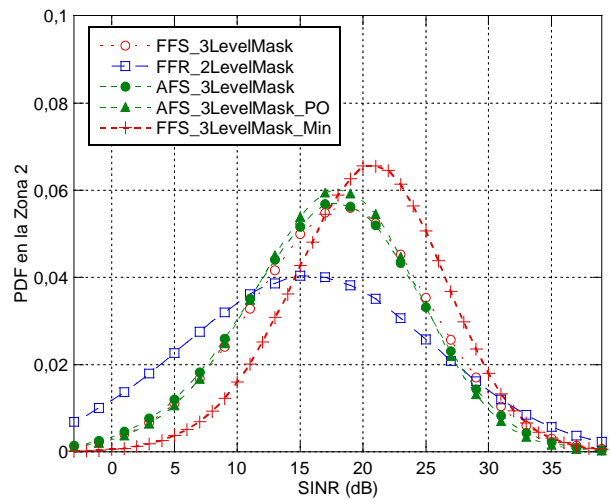
b0) Estimación ideal, zona 1



b1) CQI anterior, zona 1



c0) Estimación ideal, zona 2



c1) CQI anterior, zona 2

Figura 3.22: Comparación de la PDF de la SINR para 120km/h

Esto implica que la dispersión en la PDF aumenta y las curvas se asemejan a las mostradas en la Figura 3.16, donde el Rayleigh no se estimaba en la asignación de potencia y se generaba independientemente de una subtrama a otra.

En cuanto a la comparación entre los algoritmos, se puede afirmar que presentan un comportamiento relativo similar al caso de 3km/h: el algoritmo FFR_2LevelMask ofrece las peores prestaciones en términos de SINR, tanto en el valor promedio como en la varianza. Este efecto se corrige en los algoritmos con AFS, aunque los porcentajes de acceso se ven claramente reducidos. La diferencia más notable la presenta el algoritmo FFS_3LevelMask_Min: aunque sigue proporcionando los mejores resultados en términos de SINR ofrecida al usuario, ya no muestra un pico tan elevado en el valor de SINR deseada como sucedía en la Figura 3.20. Esto se debe a la mayor variabilidad que presenta la interferencia en 120km/h y que imposibilita una estimación de la potencia requerida por el usuario tan precisa como en el caso de 3km/h. Por otra parte, en las figuras se puede apreciar también que el valor medio de la SINR se obtiene cada vez en valores más bajos a medida que nos alejamos del centro de la celda, siendo este efecto mucho más relevante en el caso de utilizar el CQI de la subtrama anterior. Este hecho se debe fundamentalmente a que en la estimación del canal se está utilizando una única muestra de interferencia: la medida por el usuario en la subtrama anterior. Con este procedimiento, el scheduler tenderá a asignar a los usuarios en aquellos RBs donde vieron unas mejores condiciones de canal en la subtrama inmediatamente anterior. Si la interferencia observada en el RB varía como resultado de las asignaciones realizadas en otras celdas, su efecto será más significativo en los usuarios exteriores puesto que están más expuestos a ella. La razón por la que este efecto es más apreciable al utilizar el CQI anterior es que el canal también se estima a partir de la muestra anterior, en lugar de estimarse idealmente. Por tanto, dado que a 120km/h el canal está prácticamente incorrelado entre subtramas consecutivas, su impacto se añade al de la interferencia resultando en un

empeoramiento progresivo de la SINR media a medida que nos alejamos del centro de la celda.

3.4 Conclusiones

En el presente capítulo se han analizado las prestaciones ofrecidas por distintos mecanismos de coordinación de interferencia y de un conjunto de algoritmos de asignación de recursos radio (RBs y potencia) en diferentes condiciones de evaluación. A tenor de los resultados expuestos anteriormente se pueden extraer diversas conclusiones: por un lado, los algoritmos basados en sectorización estática no permiten adaptarse a las distribuciones heterogéneas de carga entre sectores, resultando en situaciones de bloqueo en los sectores más cargados e infrautilización de recursos en los sectores con menos usuarios. Este problema se soluciona al aplicar esquemas de sectorización adaptativa o basados en reuso fraccional ya que permiten una mayor libertad en la asignación de recursos, logrando así una mejor utilización de los recursos de la celda, a costa claro está de un aumento de la ICI. Por tanto, en el diseño de algoritmos de asignación de recursos y control de ICI que se realiza en los capítulos posteriores deberá de tenerse en cuenta esta necesidad de flexibilizar el reparto de recursos entre los sectores para evitar estas situaciones de bloqueo en condiciones de carga heterogénea.

El algoritmo FFR_2LevelMask es el que consigue en todos los escenarios analizados los mejores porcentajes de acceso globales. Los algoritmos basados en sectorización adaptativa, y en especial AFS_3LevelMask_PO, logran también unos porcentajes de accesibilidad altos cuando se consideraba un modelo de tráfico full-buffer y una distribución de prioridades de asignación aleatoria entre usuarios. Sin embargo, en el apartado 3.3 se demostró que al aplicar un escenario más realista en cuanto al modelado del canal y del tráfico, los algoritmos AFS no lograban una flexibilidad tan elevada como en el caso de

FFR_2LevelMask debido fundamentalmente a que los RBs que podían ser ocupados a otros sectores se asignaban siempre a usuarios con una potencia de transmisión muy baja. Esto significaba que los usuarios del exterior de la celda rara vez podían beneficiarse de la sectorización adaptativa y lograban un acceso reducido al no encontrar suficientes RBs con la potencia de transmisión adecuada para recibir servicio. En el caso de FFR, al no definir este tipo de limitaciones, resulta mucho más flexible para adaptarse a estas condiciones heterogéneas de tráfico. Por el contrario, en todos los casos se observa que la calidad de la señal recibida por el usuario en el caso de FFR_2LevelMask es sensiblemente inferior a la proporcionada por los algoritmos AFS debido a que estos mantienen en gran medida la sectorización en los RBs, con lo que la interferencia resulta mucho más estable y predecible por el estimador de canal, posibilitando una asignación de recursos más precisa. Cabe plantearse por tanto que la opción elegida para el desarrollo de algoritmos de asignación de recursos en los capítulos posteriores esté a medio camino entre ambas propuestas, de modo que se intenten mantener en la mayor parte de las ocasiones una sectorización en los recursos frecuenciales puesto que se obtiene una mejor SINR, lo que se traduce en menos retransmisiones de paquetes y por tanto en menos carga real en la celda, pero que sea más flexible a la hora de ocupar los recursos preasignados a otros sectores de la celda.

Si se analizan las prestaciones de los usuarios de la zona exterior de la celda, se observa que son muy sensibles al reuso de RBs en los sectores vecinos debido a que la potencia interferente que reciben es comparable a la potencia útil. La SINR con el algoritmo FFR_2LevelMask decrece claramente en la zona 2, ya que los RBs asignados a los usuarios del exterior en este sistema pueden ser asignados en cualquier sector de las celdas vecinas. El resultado es una potencia interferente elevada y muy variable que impide obtener una calidad de señal adecuada a los usuarios de exterior de la celda. Por el contrario, al utilizar AFS, los RBs ocupados a otros sectores se asignan a los usuarios que requieren menor

potencia en ellos y por tanto generan menos interferencia. Este hecho, que permite mejorar la SINR ofrecida a los usuarios del exterior como se observa en las curvas anteriores, sigue provocando unas condiciones de interferencia elevada en la región exterior de la celda puesto que sus RBs pueden ser reutilizados en los sectores más próximos de las celdas vecinas, y de ahí también que los porcentajes de acceso en la zona 2 no sean tan elevados con AFS. Es preciso por tanto mejorar aún más las condiciones de interferencia que observan los usuarios del exterior de la celda, lo que pasa por aplicar una sectorización estática en el exterior de modo que la interferencia en los RBs de dicha subbanda provenga siempre de un único sector de las celdas vecinas, resultando en una interferencia mucho más estable. De este modo es posible crear RBs con unas mejores condiciones de interferencia para que más usuarios del exterior de la celda puedan recibir servicio. En cambio, en la subbanda interior los usuarios están más protegidos frente a interferencias por una mayor distancia a las BSs vecinas, por lo que el esquema de reuso puede ser más agresivo. Se pueden definir por tanto dos subbandas en el sistema claramente diferenciadas: la subbanda interior, orientada a asignar a los usuarios interiores de la celda y en la que se aplica un acceso similar a FFR pero manteniendo la sectorización frecuencial en la medida de lo posible para garantizar una mejor SINR, y una subbanda exterior que utiliza sectorización estática para reducir y estabilizar la interferencia sufrida por los usuarios exteriores y lograr así una mejora en el acceso de los mismos. La definición de una subbanda exterior sectorizada limita las libertades del scheduler para asignar a estos usuarios exteriores, pero resulta más conveniente esta aproximación puesto que se consiguen unos RBs con buenas condiciones de interferencia para poder asignar a dichos usuarios exteriores.

Por otro lado, las simulaciones mostradas anteriormente indican que si bien en términos de cobertura sí resultaba adecuado definir una máscara de tres niveles de potencia, cuando se aplican algoritmos de asignación dinámica de

recursos no se aprecia una clara ganancia de las mismas: existe una caída evidente de los porcentajes de acceso para los usuarios de la zona 1, a pesar de presupuestar una potencia de transmisión superior para ellos. Tal y como se apunta en [González y otros, 2010], añadir más niveles en la máscara de potencia tiene una ganancia limitada. En general, parece mejor disponer de un único nivel con un valor de potencia intermedio, ya que el scheduler dispondrá de un mayor número de RBs candidatos susceptibles de ser asignados a usuarios de la zona 1 cumpliendo los requisitos mínimos de SINR. La definición de más niveles reduce las libertades del scheduler, no en la implementación del algoritmo, pero sí en su resultado final, ya que por ejemplo los niveles de la máscara mínima no son suficientes para permitir su uso habitual en la zona 1. En el caso de los usuarios exteriores de la celda, debido a que sus pérdidas por propagación son muy superiores al resto de usuarios de la celda, sí que resulta necesario un nivel de potencia transmitida más alto, lo que permite mejorar el grado de equitatividad del sistema. Por tanto, cabe plantearse fusionar en un único nivel los niveles 0 y 1 de la máscara de potencia, de forma similar a como se ha propuesto para el algoritmo FFR.

Por último, las gráficas de SINR correspondientes a FFS_3LevelMask_Min muestran que con diferencia es el algoritmo que mejores prestaciones ofrece por el uso de máscaras mínimas y permutación en las asignaciones. Sin embargo, la permutación en las asignaciones limita enormemente las libertades del scheduler al definir un orden fijo a seguir en la ocupación de los RBs. Esto va en contra de la flexibilidad en la asignación de RBs demandada anteriormente y por tanto no es una opción que deba contemplarse en el diseño futuro de otros algoritmos más robustos para la asignación de recursos radio. Por el contrario, el uso de máscaras mínimas es un modo efectivo de reducir la variabilidad de la ICI, lo que resulta de especial relevancia en las redes OFDMA. Como contrapartida, se reduce el margen de potencia disponible en la celda para la asignación de usuarios con mayores requisitos de potencia. En la subbanda

exterior se utiliza un nivel de potencia superior para alcanzar a los usuarios localizados en la zona exterior de la celda. En dicha subbanda es preferible aplicar un esquema de potencia constante de modo que la interferencia observada en ella sea lo más estable posible y mejorar así las condiciones de estos usuarios.

En resumen, analizando todos los resultados en conjunto, se puede afirmar que la mejor solución para garantizar una flexibilidad suficiente y una calidad de señal adecuada a lo largo de la celda pasa por definir un esquema de reuso fraccional con una subbanda exterior donde se aplica sectorización frecuencial y potencia constante para unas mejores condiciones de interferencia en los usuarios situados en el borde de celda (similar al esquema hard-FFR de la Figura 2.18c), y una subbanda interior con una sectorización dinámica y un algoritmo de asignación de potencia que incluya el uso de máscaras mínimas. Este esquema fraccional constituye la base sobre la que se definirán en los capítulos posteriores una serie de algoritmos de asignación de recursos que gestionen no solo los RBs y la potencia, sino también la tasa asignada a cada usuario para garantizar la provisión de la QoS demandada por sus servicios.

Capítulo 4

Algoritmos Basados en FFR para la Asignación Dinámica de Potencia, Subportadoras y MCS, y Provisión de QoS

Las simulaciones mostradas en el capítulo anterior demostraron la necesidad de aplicar mecanismos de coordinación de interferencias para mejorar las condiciones de canal experimentadas por los usuarios del exterior de la celda. De este modo, es posible incrementar la tasa cursada por estos usuarios pero se incurre en una penalización en la tasa total servida por la celda debida a las restricciones impuestas en el acceso a ciertos RBs. A partir de los esquemas de coordinación evaluados, como ya se argumentó en el capítulo anterior, parece lógico apostar por un esquema de sectorización en el exterior de la celda para mejorar las condiciones de interferencia de estos usuarios, mientras que en el interior se pueden aplicar esquemas de reuso unidad que permitan mejorar la accesibilidad a los recursos, y consecuentemente, la tasa promedio servida por la celda. No obstante, el objetivo en el interior es también intentar aplicar un esquema de asignación de recursos que se aproxime, tanto como sea posible, a

un esquema de sectorización “virtual” con el fin de combatir el efecto de la variabilidad de la interferencia. Por tanto, los algoritmos propuestos en este capítulo partirán de un esquema de coordinación de interferencias FFR con sectorización en el exterior, como el mostrado en la Figura 2.18c, pero sobre el que se aplicarán ciertas modificaciones para mejorar la estabilidad de la interferencia en la subbanda interior.

Como se ha comentado en el capítulo 2, en la bibliografía existen un gran número de propuestas para la asignación de recursos radio pero muchas de ellas no son aplicables en un sistema real. Múltiples propuestas parten de planteamientos matemáticos en los que el scheduling se reduce a resolver una ecuación más o menos compleja con ciertas condiciones de contorno. Sin embargo, para poder llegar a un resultado cerrado, es preciso aplicar un gran número de simplificaciones que alejan la solución del óptimo para el que fueron planteados. Por otra parte, estos planteamientos matemáticos presentan grandes limitaciones para incorporar condicionantes o restricciones impuestas por la implementación práctica de los sistemas reales. Por este motivo, en nuestro caso, los algoritmos propuestos serán siempre algoritmos heurísticos puesto que permiten aplicar de forma más simple restricciones en la asignación de recursos, como por ejemplo, las restricciones debidas al esquema de coordinación de interferencias. En este capítulo asumiremos como punto de partida que cada RB puede ser asignado una sola vez dentro de la celda, con lo que no existe interferencia intracelular. Con objeto de incrementar el reuso en un contexto de altos requisitos de capacidad, en el capítulo siguiente se presentarán una serie de algoritmos que contemplan la posibilidad de asignar varias veces dentro de la celda el mismo RB, lo que exige tomar en consideración el efecto de la interferencia intracelular. Por otra parte, en la literatura son abundantes las propuestas que buscan maximizar el rendimiento de los recursos radio asignando más recursos a aquellos usuarios que mejores condiciones de canal observan, pero no tienen en cuenta la QoS ofrecida a los

mismos. Sin embargo, la capacidad de los algoritmos propuestos para proporcionar QoS a los usuarios es un factor determinante a analizar para fijar la idoneidad del mismo para ser aplicado en sistemas reales.

En este sentido, las estrategias de scheduling temporal son las encargadas de determinar la prioridad de asignación de las conexiones con datos pendientes, información que es suministrada al scheduler frecuencial para determinar la asignación más eficiente para cada subtrama. Como se verá en este capítulo, solo cuando el esquema de scheduling temporal sigue con precisión las variaciones en el tráfico servido a cada conexión, es posible obtener una gestión realmente buena de la QoS. En este sentido, las tareas de scheduling temporal y frecuencial se entremezclan para dar lugar a algoritmos de asignación de recursos completos que permiten obtener unas buenas prestaciones en términos de capacidad de la celda.

La estrategia concreta de scheduling temporal aplicada en cada caso determina el objetivo de QoS que se pretende satisfacer. Por ejemplo, la estrategia PF busca maximizar el throughput servido en la celda pero no garantiza el cumplimiento de la QoS de los usuarios. En el caso de servicios dependientes del retardo, que son los servicios más restrictivos en cuanto a percepción del usuario, es necesario aplicar estrategias de scheduling que tengan en cuenta el retardo acumulado por los paquetes a la hora de priorizar las conexiones. De las innumerables propuestas que pueden encontrarse en la bibliografía, en este capítulo nos centraremos en las más comunes y estudiaremos las prestaciones que ofrecen para los algoritmos de asignación de recursos más eficaces.

Este capítulo se ha estructurado como sigue: en el apartado 4.1 se estudiará la variabilidad de la interferencia en sistemas basados en FFR y se propondrá una solución basada en la asignación ordenada de RBs. Tomando estos

resultados como referencia, en el apartado 4.2 se propondrán y analizarán una serie de algoritmos de asignación de recursos radio para el control de la interferencia en sistemas OFDMA. Finalmente, el apartado 4.3 evaluará las capacidades de los algoritmos propuestos para garantizar la provisión de QoS para servicios dependientes del retardo, mediante la incorporación de estrategias de scheduling temporal.

4.1 Análisis de la variabilidad de la ICI en sistemas FFR con diferentes mecanismos de CQI

En este apartado se analiza el impacto de la variabilidad de la interferencia intercelular en el DL sobre el mecanismo de estimación y envío de informes de las condiciones de canal observadas por el usuario. Este aspecto es de especial importancia para los algoritmos basados en FFR, debido a la alta variabilidad de la interferencia inherente a este esquema de coordinación.

Asumiendo un mecanismo básico de CQI como el mostrado en la Figura 4.1, el usuario realiza un promediado temporal de W_{CQI} muestras del canal medidas en cada RB durante un intervalo determinado de tiempo, valores que son enviados a la BS con cierta periodicidad (ΔT_{CQI}) para dar soporte al scheduling frecuencial. Cuando las condiciones observadas por los usuarios son muy estables, el mecanismo de CQI permite seguir con precisión la evolución del canal, y por tanto es posible realizar una asignación de recursos adecuada. Sin embargo, cuando el canal presenta fuertes variaciones a corto plazo, como por ejemplo debido a altas velocidades de desplazamiento tal y como se mostró en el capítulo anterior, los CQIs enviados no representan una indicación muy fiable de las condiciones futuras en las que se realizará la transmisión de datos y su uso puede hipotecar el rendimiento de los algoritmos de asignación de recursos. Esto es, el resultado es un aumento del BLER al cometer errores en la asignación de RBs y MCSs. Dado que las variaciones del canal son

impredecibles e incontrolables por el sistema, ya que dependen de la movilidad del usuario y de cambios en el entorno de propagación de la señal, el único aspecto que los algoritmos de asignación pueden controlar es la interferencia: un algoritmo que establezca en gran medida la potencia transmitida en subtramas sucesivas ofrecerá unas condiciones de interferencia más uniformes en el tiempo y por tanto, las variaciones en las condiciones observadas por los usuarios se deberán principalmente a la componente del canal.

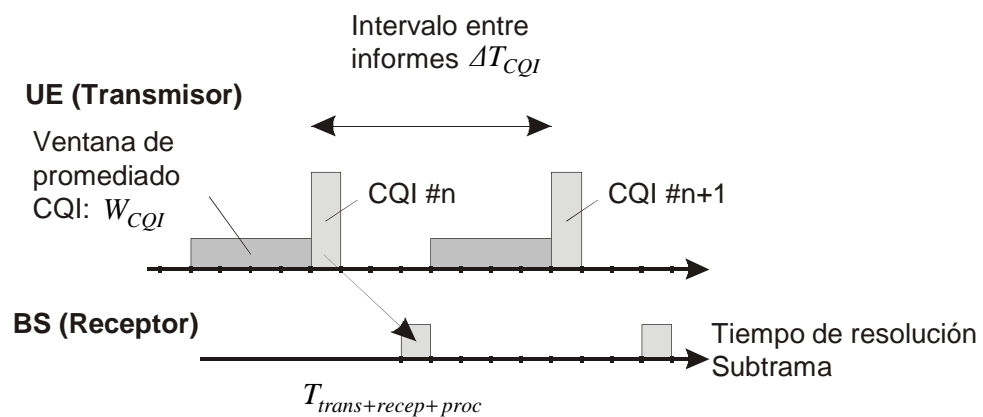


Figura 4.1: Esquema básico de envío de CQIs

El problema de la estimación de las condiciones de canal/interferencia es aún más importante en condiciones de baja carga, es decir, cuando el número de RBs necesarios para cursar la tasa total de los usuarios es muy bajo. Si no se aplican restricciones especiales en la asignación de RBs, aparece el denominado *efecto ON-OFF de la interferencia*: los RBs utilizados cambian de una subtrama a otra y por tanto el perfil de potencia transmitida se modifica rápida y bruscamente. Dado que el número de fuentes interferentes en el enlace descendente es muy bajo, típicamente unas pocas BSs de las proximidades, cuando en todas ellas un RB quede sin asignar, el usuario observará buenas condiciones de relación señal ruido debido a la ausencia de interferencia. El scheduler tenderá por tanto a asignarlo con una MCS elevada si existen datos para transmitir hacia el usuario. Sin embargo, si dicho RB es asignado en la siguiente subtrama por parte de una o más BSs del entorno, el salto en la

potencia interferente observada por el usuario será elevado, produciéndose un pico de BLER al no ser capaz de demodular el bloque de datos. Este comportamiento es típico de un sistema FFR si se aplica asignación de recursos localizada y adaptación de enlace, ya que en aras de ofrecer una accesibilidad máxima, se consideran pocas restricciones en la asignación de RBs. Por tanto, una idea interesante para controlar este efecto pasa por definir un algoritmo de asignación de recursos que confine en la medida de lo posible las transmisiones en los mismos RBs a lo largo del tiempo. Lógicamente, este aspecto implica añadir restricciones adicionales al scheduling, lo que puede resultar en un aumento del bloqueo al reducir la accesibilidad a los recursos.

La parametrización considerada en el modelo de generación y envío de CQIs tendrá gran influencia en el impacto real que este efecto ON-OFF de interferencia provoca en las prestaciones del sistema. Es especialmente importante el valor de ventana de promediado considerado: una ventana muy pequeña supone que se promedian muy pocas muestras, con lo que el efecto ON-OFF aparecerá frecuentemente pero el canal podrá seguirse con mayor fidelidad. Por el contrario, al utilizar una ventana de promediado más grande se evita en gran medida la aparición del efecto ON-OFF pero la precisión en la estimación de la calidad del canal será menor. Es por esto que en este apartado se estudiará el impacto de este efecto en sistemas FFR con diferentes parametrizaciones del mecanismo de CQI.

4.1.1 Algoritmos de asignación de recursos considerados

Las simulaciones mostradas en el capítulo anterior indicaban que cuando se considera un modelo del sistema realista donde se han de garantizar los requisitos de los usuarios en términos de QoS, los esquemas de asignación de recursos que aplican demasiadas restricciones para mejorar la calidad de la señal resultan ineficientes. Si bien en el exterior de la celda sí es preciso

garantizar dicha calidad debido a las malas condiciones de canal que experimentan estos usuarios, en la zona interior es posible aplicar un esquema de reuso más agresivo para mejorar la accesibilidad a los recursos. Además, el uso de muchos niveles en las máscaras de potencia no se traduce en una mejora neta en las prestaciones debido a que imponen un mayor número de restricciones que limitan la libertad del scheduler. Se concluye por tanto que el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior (Figura 4.2) será una buena base de partida para elaborar nuevas propuestas de coordinación de interferencias en redes OFDMA. En esta sección se describen los dos algoritmos de asignación de recursos radio utilizados para estudiar el impacto de la variación de la interferencia bajo dicho esquema de coordinación de ICI.

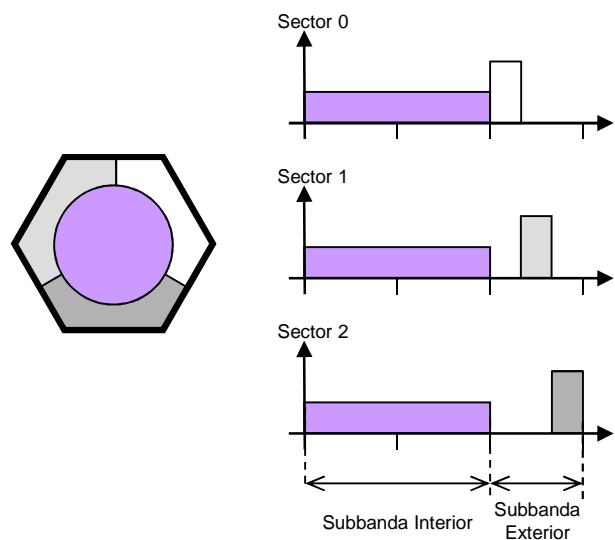


Figura 4.2: Esquema FFR con sectorización en el exterior

La subbanda exterior se compone de 9 RBs, 3 para cada sector, que serán transmitidos con mayor potencia para alcanzar el límite de la celda, mientras que la subbanda interior consta de los 18 RBs restantes del sistema en los que se aplicará reuso unidad a nivel de celda. Con el fin de facilitar el análisis del efecto ON-OFF de la interferencia, se ha supuesto que la potencia transmitida en cada RB no se ajuste a las condiciones del canal, sino que se mantiene constante en el tiempo, con lo que la variabilidad más significativa en la interferencia se deberá

al cambio en los RBs asignados en las celdas vecinas. No se considerará tampoco la adaptación de la MCS puesto que el objetivo de estos algoritmos preliminares es analizar la variabilidad que provocan en la interferencia y cómo esto se traduce en errores en la asignación de recursos con diferentes parametrizaciones del esquema de CQIs.

A continuación se describen los dos algoritmos considerados en este análisis de la variabilidad de la interferencia. El primer algoritmo, denominado simplemente *FFR*, permite una libertad total en la asignación de RBs de la subbanda interior, lo que implica la aparición con mucha frecuencia del efecto ON-OFF de la interferencia. Para mitigar este efecto dañino, como primera propuesta de mejora, el algoritmo *FFRo* aplicará una ordenación en la ocupación de RBs que permitirá mejorar el seguimiento del estado del canal proporcionado por el esquema de CQI.

4.1.1.1 Reúso fraccional (FFR)

El algoritmo FFR es una implementación directa del esquema de coordinación FFR con sectorización en el exterior. Los usuarios recibirán preferentemente asignaciones de recursos en aquellos RBs de la subbanda interior donde observen las mejores condiciones de canal, siguiendo el planteamiento de gran parte de los algoritmos de asignación dinámica de recursos que pueden encontrarse en la literatura. Si se estima que un usuario no puede conseguir la suficiente SINR en ningún RB libre de la subbanda interior, se inicia una fase de renegociación de las preasignaciones efectuadas a otros usuarios en la subbanda interior, de tal forma que las asignaciones realizadas hasta el momento pueden ser modificadas para dar cabida a este nuevo usuario. Si un usuario no puede recibir asignaciones en la subbanda interior incluso tras la reasignación, se mantendrá la asignación inicial y se probará a asignar recursos al usuario en la subbanda exterior. El objetivo de este esquema es

preservar los recursos de mayor potencia (RBs del exterior) para los usuarios que realmente se encuentran en peores condiciones de canal.

Los pasos seguidos por el algoritmo FFR son los siguientes:

Paso 1 Calcular para cada conexión k la prioridad de asignación P_k del paquete cabeza de cola (*HoL: Head of Line*) en función del criterio de scheduling temporal elegido. Ordenar la lista de conexiones activas de forma decreciente de acuerdo con la prioridad de asignación P_k .

Paso 2 Por orden de prioridad, y mientras existan RBs libres, asignar RBs a cada conexión para transmitir su tasa requerida. Se elegirán el conjunto de RBs contiguos en el que la conexión experimente mejores condiciones de canal. Se intenta ocupar la subbanda interior de forma preferente, y en caso de no ser posible se intenta la asignación en la subbandas exterior. Así, si asumimos que la conexión k es la que debe recibir ahora servicio por el orden de prioridad, el procedimiento consiste en:

Paso 2.1: Asignar un RB libre de la subbanda interior en la que el usuario pueda alcanzar la SINR deseada con la potencia asignada. Si se produce la asignación, volver al paso 2 con la siguiente conexión por orden de prioridad. En caso contrario, proceder al paso 2.2.

Paso 2.2: Intentar una renegociación de las asignaciones anteriores de la subbanda interior para poder asignar recursos a la nueva conexión. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 2 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 2.3: Intentar la asignación de la conexión k en la subbanda exterior. Si se produce la asignación, volver al paso 2 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 2.4: Renegociar las asignaciones existentes desplazando las asignaciones de otras conexiones a RBs libres tanto de la subbanda interior como de la exterior (respetando el reúso 1/3 de la subbanda exterior) para poder asignar la nueva conexión. Tanto si la renegociación es exitosa como si no, volver al paso 2 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 3 Una vez que todas las conexiones han recibido una oportunidad de asignación y mientras queden RBs libres, se va a intentar asignar un RB adicional a cada conexión que disponga de tráfico pendiente en sus buffers, con el mismo orden de prioridad obtenido en el paso 1. Supongamos que de acuerdo al orden de priorización, se toma la conexión k , que todavía tiene paquetes en cola pendientes de transmisión, y se realiza el siguiente procedimiento:

Paso 3.1: Asignar a la conexión k un RB libre de la subbanda en la que recibió la asignación previa. Si se produce la asignación, volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 3.2: Intentar la renegociación para asignar el RB adicional en la subbanda correspondiente. Volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

4.1.1.2 Reúso fraccional con ordenación (FFRo)

La libertad en la asignación de RBs de la subbanda interior que proporciona el algoritmo FFR implica un incremento en la variabilidad de la potencia interferente observada por los móviles debido al cambio constante de los RBs asignados en cada subtrama. El objetivo este nuevo algoritmo FFRo es establecer un ordenamiento en la asignación de RBs en la zona interior de modo que en situaciones de baja carga, cuando el efecto ON-OFF de la interferencia es más dañino, se mantenga una sectorización en la subbanda interior para

mantener la interferencia más estable. En cualquier caso, los RBs no están asignados de forma rígida a los sectores (como sí sucede en la sectorización clásica), sino que se propone un esquema dinámico de gestión de RBs por el que en condiciones de alta carga, los UEs de un sector pueden ocupar RBs de otro, evitando así la aparición de bloqueo.

Los RBs de la subbanda interior se agrupan en tres subbandas, cada una de las cuales se asocia a un sector distinto de la celda. Los sectores asignarán primero los RBs de su subbanda preasignada de forma ordenada, de modo que si la carga es similar en dos TTIs consecutivos, se ocuparán aproximadamente los mismos RBs y el espectro de potencia radiada en subtramas consecutivas será similar. Sin embargo, si se aplica este mecanismo de ordenación de forma estricta, la asignación de las primeras conexiones de cada TTI tendrá un alto bloqueo porque el número de RBs en los que pueden ser asignados es muy reducido. Para evitarlo, se define un *grupo inicial de RBs* (compuesto por *SG* RBs y denomina grupo *SG* por simplicidad) que pueden ser asignados en cada subbanda sin seguir un ordenamiento predefinido: al inicio del algoritmo se realiza una estimación de los RBs que van a ser necesarios para la asignación de las conexiones con datos pendientes en los buffers en cada sector. Dado que es improbable un cambio brusco en el número de UEs activos entre dos TTIs consecutivos, el número de RBs ocupados en cada subbanda en el TTI anterior es una buena estimación de los RBs necesarios en el presente TTI. Así, si en la subbanda preasignada al sector 0 se ocuparon en el TTI anterior un total de *SG* RBs por usuarios de ese sector, en el TTI actual se asume que el grupo inicial del sector se compone también de *SG* RBs. Una vez asignados todos ellos, se procede a la asignación del resto de RBs de la subbanda del sector siguiendo un ordenamiento estricto de la asignación.

Cuando un sector ha asignado todos los RBs de su subbanda, comienza a ocupar RBs de otros sectores. Estos RBs ocupados también se asignarán

siguiendo la ordenación, es decir, se asignará el siguiente RB a los actualmente ya asignados en la subbanda del sector ocupado. Un ejemplo de dicha ocupación se muestra en la celda 0 de la Figura 4.3: el sector 0 ya ha asignado todos los RBs de su subbanda y cuando necesita asignar recursos a un usuario más, ocupa el primer RB disponible de la subbanda del sector 1, marcado con diferente relleno en la figura. Después, el sector 1 continuará asignando el siguiente RB de su subbanda para un usuario suyo. Entre los muchos criterios existentes para decidir de qué sector se toman RBs, se ha optado por ocupar RBs de aquel sector que tiene un menor número de conexiones con datos pendientes, es decir, el que en teoría asignará menos RBs.

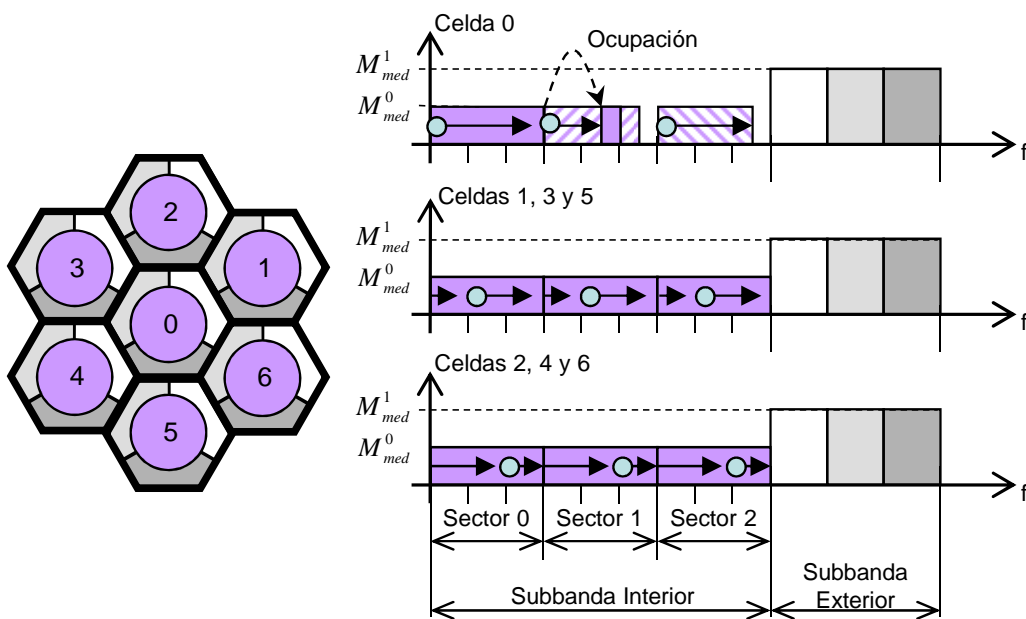


Figura 4.3: Ordenación en la asignación de RBs para FFRo

Además, con la intención de reducir la potencia interferente en condiciones de baja carga, se introduce un cierto offset en la ordenación de modo que celdas contiguas empiezan a asignar la subbanda interior en posiciones distintas. En el ejemplo de la Figura 4.3, cada sector comienza la asignación de su subbanda en diferente RB (marcado con un círculo) que sus celdas vecinas, procediendo con un desplazamiento circular hasta asignar todos los RBs de su subbanda

preasignada. La Figura 4.4 muestra un ejemplo numérico del orden de asignación de RBs en cada sector cuando la subbanda preasignada a cada sector se compone de 6 RBs. En condiciones de baja carga, este decalado reduce la probabilidad de que un RB sea asignado por dos celdas vecinas, con lo que las condiciones de interferencia observadas por los usuarios serán muy buenas. A modo de ejemplo, supongamos que la carga de cada sector del escenario puede ser cursada con dos RBs. Entonces, los RBs asignados en cada sector se muestran marcados en rojo en la Figura 4.4. Como se puede comprobar, dos sectores vecinos no asignan nunca los mismos RBs, que era el objetivo buscado con el decalado.

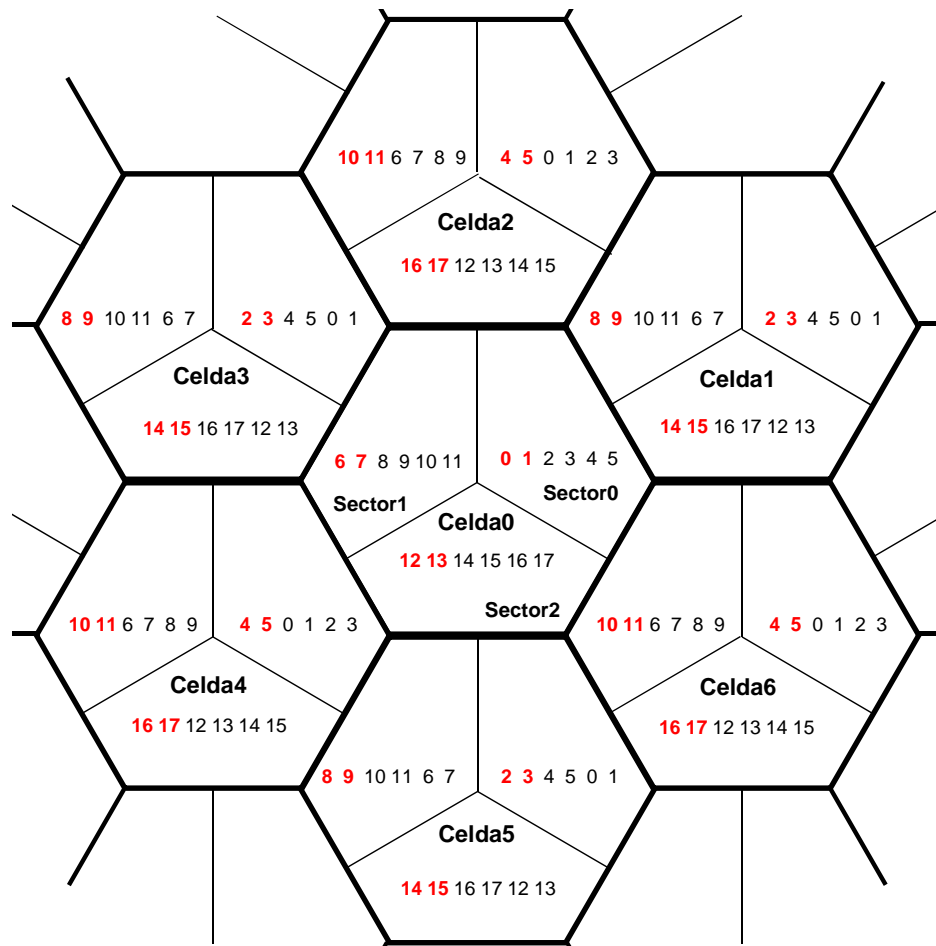


Figura 4.4: Ejemplo de ordenación para el algoritmo FFRo en la subbanda interior

A continuación se describen con detalle los pasos que sigue el algoritmo FFRo:

Paso 1 Determinar el grupo inicial de RBs asignables de forma no ordenada de acuerdo con el número de RBs asignados a las conexiones de cada sector en la subtrama anterior.

Paso 2 Calcular para cada flujo de datos la prioridad de asignación P_k del paquete cabeza de cola (HoL) de cada conexión k . Ordenar la lista de conexiones activas de forma decreciente de acuerdo con la prioridad de asignación P_k .

Paso 3 Mientras existan RBs libres, asignar a cada conexión RBs del grupo inicial (en los que mejores condiciones de canal experimenten). Asumamos que por prioridad debe recibir servicio la conexión k . Si ya no quedan RBs libres en el grupo inicial del sector al que pertenece la conexión, saltar al paso 4. En caso contrario, proseguir como se describe:

Paso 3.1: Asignar el RB libre del grupo inicial de RBs de su sector en el que observe las mejores condiciones de canal, si la potencia requerida para alcanzar la SINR deseada está por debajo de la máscara de potencia. Si se produce la asignación, volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 3.2: Intentar una renegociación de las asignaciones anteriores del grupo inicial del sector para poder asignar recursos a la nueva conexión. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 3.3: Intentar la asignación de la conexión k en la subbanda exterior. Si se produce la asignación, volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 3.4: Intentar una renegociación de las asignaciones existentes en el grupo inicial del sector y en su subbanda exterior para poder asignar la nueva conexión. Tanto si la renegociación es exitosa como si no, se vuelve al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 4 Cuando todos los RBs del grupo inicial han sido asignados, se continúa asignando los RBs de la subbanda preasignada al sector al que pertenece la conexión, siguiendo la ordenación marcada por la coordinación. Si todos los RBs de la subbanda preasignada al sector ya se han asignado, se ocupan RBs de las subbandas de otros sectores como se ha descrito anteriormente. En concreto se intenta asignar el primer RB libre (siguiendo la ordenación en la asignación de RBs) del sector con menor número de conexiones con tráfico pendiente. En cualquiera de los dos casos, se aplican 4 intentos de asignación análogos a los descritos en el paso anterior: primero en la subbanda interior y posteriormente en la exterior, aplicando renegociaciones si es necesario. Volver al paso 3 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 5 Una vez que todas las conexiones han recibido una oportunidad de asignación y mientras queden RBs libres, se asigna un RB adicional a cada conexión que disponga de tráfico pendiente en sus buffers, con el mismo orden de prioridad obtenido al inicio del algoritmo en el paso 2. Se procede de forma análoga al paso 3 del algoritmo FFR, pero siguiendo la ordenación en la asignación de RBs.

4.1.2 Evaluación de las propuestas

En esta sección se presenta una comparativa de las prestaciones de los dos algoritmos de asignación detallados anteriormente desde un punto de vista de

estabilidad en la interferencia generada. En el apartado 4.2 se ofrecerá un análisis más profundo de las prestaciones en términos de provisión de QoS que estas propuestas serán capaces de ofrecer para distinto número de usuarios en la celda.

4.1.2.1 Condiciones de simulación

Las simulaciones presentadas en esta sección aplican un modelo de sistema similar al utilizado en el último apartado del capítulo anterior, tanto en lo referente al modelo de canal, considerando la dependencia temporal del mismo, como al esquema de scheduling temporal, utilizando el criterio Tasa (ecuación (3.17)), que se calcula como el ratio entre la tasa servida al usuario y su tasa promedio requerida. Los usuarios presentan una distribución homogénea a lo largo del área de cobertura de la celda y se desplazan a una velocidad de 3km/h dentro de su propio sector para evitar handovers. El servicio de datos se modela según un proceso ON-OFF con un factor de actividad del 25%. Puesto que el efecto ON-OFF de la interferencia es más perjudicial en condiciones de baja carga, la evaluación presentada a continuación asume que existe un número promedio de 18 conexiones activas por celda, lo que equivale a una carga promedio aproximada en la celda del 16%, es decir, 4,5 RBs asignados en promedio de los 27 disponibles.

Para calcular las máscaras de potencia aplicadas en ambos algoritmos se asume que un sector podrá asignar como máximo todos los RBs de la subbanda interior más su tercio correspondiente de la subbanda exterior. Así, los valores de la máscara de potencia se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Máscaras de potencia para los algoritmos basados en FFR

	<i>dBm/RB</i>	<i>dBm/portadora</i>
M_{med}^0	26	15.2
M_{med}^1	31	20.2

4.1.2.2 Resultados de las simulaciones

Para comprobar el comportamiento real del mecanismo de ordenación aplicado en FFRo, vamos a analizar brevemente el perfil de asignación de RBs que se produce alrededor de una celda dada. Tomando por ejemplo la celda 0, la Figura 4.5 muestra para cada uno de los RBs de la subbanda interior, el porcentaje de TTIs en las que ese RB ha sido asignado por alguna de las celdas vecinas a la celda 0 (un valor del 100% significaría que ese RB ha sido asignado por las 6 celdas vecinas en todos los TTIs). Se puede apreciar claramente que mientras con FFR se asignan todos los RBs por igual, en FFRo la probabilidad de que las celdas vecinas asignen los primeros de la celda 0 es muy baja (RBs señalados con un círculo en la figura). Esto supone que en la mayor parte de las ocasiones, las transmisiones realizadas por la celda 0 en los primeros RBs que asigna (RBs 0, 1, 6, 7, 12 y 13), se producirán libres de interferencias y los usuarios podrán alcanzar una elevada SINR en ellos. Este efecto es el mismo para cualquier celda del escenario.

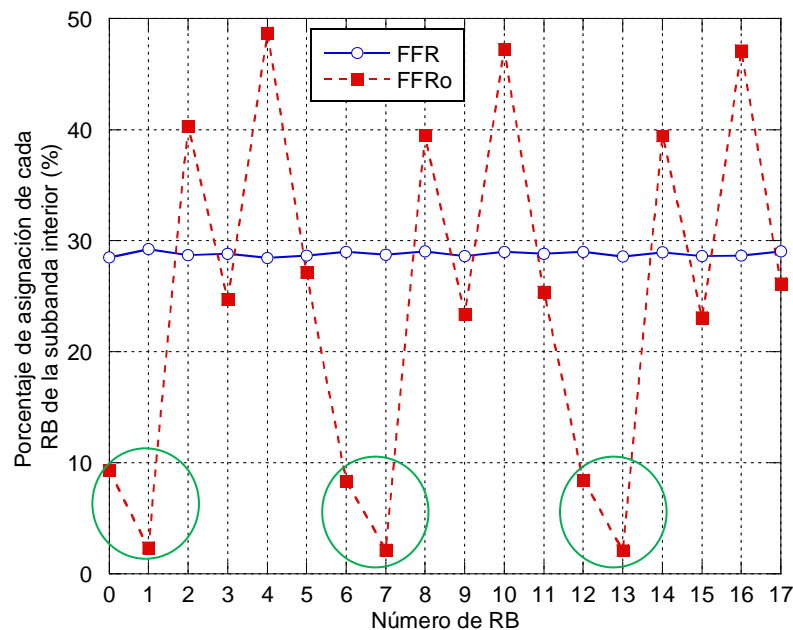


Figura 4.5: Porcentaje de asignación de cada RB en la subbanda interior

La gráfica anterior permite intuir que al concentrar las transmisiones en determinados RBs, las ocasiones en las que se produce un efecto ON-OFF de la interferencia se reducen significativamente, lo que mejorará el comportamiento de los algoritmos al ser capaces de estimar con mayor fiabilidad las condiciones reales de interferencia en las que se producirá la transmisión de datos. Para analizar con detalle este aspecto, se define el *error de estimación* como se muestra en (4.1), donde I_{rec} es la potencia interferente recibida en un RB e I_{pres} es la interferencia estimada en dicho RB con la que se realizó la asignación de recursos en base a los CQIs transmitidos por el usuario.

$$Error(dB) = 10 \log \left(\frac{I_{rec}}{I_{pres}} \right) \quad (4.1)$$

Atendiendo a la definición del error de interferencia pueden darse los siguientes casos:

- $Error=0$: este caso se da cuando no existe error en la estimación de la interferencia, es decir, $I_{rec}=I_{pres}$.
- $Error \neq 0$: existe error en la estimación de la interferencia, pero I_{rec} e I_{pres} son distintas de cero.
- $Error \rightarrow -\infty$: este caso ocurre cuando $I_{rec}=0$ pero $I_{pres} \neq 0$. Por tanto, nos indica en cuántas ocasiones se produce una transición de ON a OFF, es decir, en el CQI se reporta un valor de interferencia en el RB, pero a la hora de realizar la transmisión de datos, el usuario no recibe ninguna interferencia. En este caso, se produce una estimación pesimista de las condiciones y se asignará una MCS más baja de la que el usuario podía haber recibido sin error.
- $Error \rightarrow +\infty$: se produce cuando $I_{rec} \neq 0$ pero $I_{pres}=0$. Al contrario que en el caso anterior, este valor de error muestra las ocasiones en las que se produce una transición de OFF a ON, o lo que es lo mismo, en el CQI no se reporta un valor de interferencia en el RB, pero en el momento de hacer la transmisión sí existe interferencia. Este es el caso más

perjudicial puesto que el sistema sobrestima las condiciones de canal y asigna MCSs elevadas que se ven altamente degradadas al producirse la interferencia imprevista. En la práctica totalidad de las ocasiones, este caso supondrá la recepción con errores del bloque de datos y la necesidad de retransmitirlo con posterioridad.

La Figura 4.6 muestra la PDF del error de estimación para el algoritmo FFR con diferentes parámetros de CQI (valores de W_{CQI} y t_{CQI}) para 3km/h. Se han eliminado intencionalmente los casos de $I_{rec}=I_{pres}=0$ para visualizar mejor el resto de casos. Así mismo, las gráficas de la derecha son un zoom para valores de error en torno a $Error=0$, que permiten ver con detalle la precisión obtenida en cada caso en la estimación de la interferencia. La Figura 4.6a muestra la PDF del error de estimación cuando se toma exclusivamente el valor de interferencia visto en un TTI ($W_{CQI}=1$). En este caso, el error de estimación se ve altamente afectado por el índice de ocupación de RBs. Podemos ver claramente que tanto en el caso de $t_{CQI}=1$ (el valor de interferencia visto en el TTI inmediatamente anterior es el tomado para la estimación) como en $t_{CQI}=4$, en la inmensa mayoría de las ocasiones existe una transición ON-OFF (valores en la PDF de -40 y 40dB) y con similar probabilidad, es decir, en tantas ocasiones se pasa de ON a OFF como al revés. Cuando tanto I_{rec} como I_{pres} toman valores distintos de cero, podemos observar en la gráfica de la derecha que con un retardo $t_{CQI}=1$ se consigue mayor precisión en la estimación de la interferencia, es decir, que cuando existe interferencia de forma persistente a lo largo del tiempo, el sistema es capaz de estimarla con bastante precisión. Tal y como se muestra en la Figura 4.7, en el 22% de las ocasiones se experimenta un error absoluto inferior a 6dB. En el caso de $t_{CQI}=4$, que es un caso más realista desde el punto de vista de implementación del sistema, se observa una pérdida de prestaciones en la estimación de la interferencia puesto que la medida que se usa en el scheduling ya tiene 4 TTIs de antigüedad. El porcentaje de usuarios con un error inferior a 6dB se reduce entonces al 8%.

4.1 Análisis de la variabilidad de la ICI en sistemas FFR con diferentes (...)

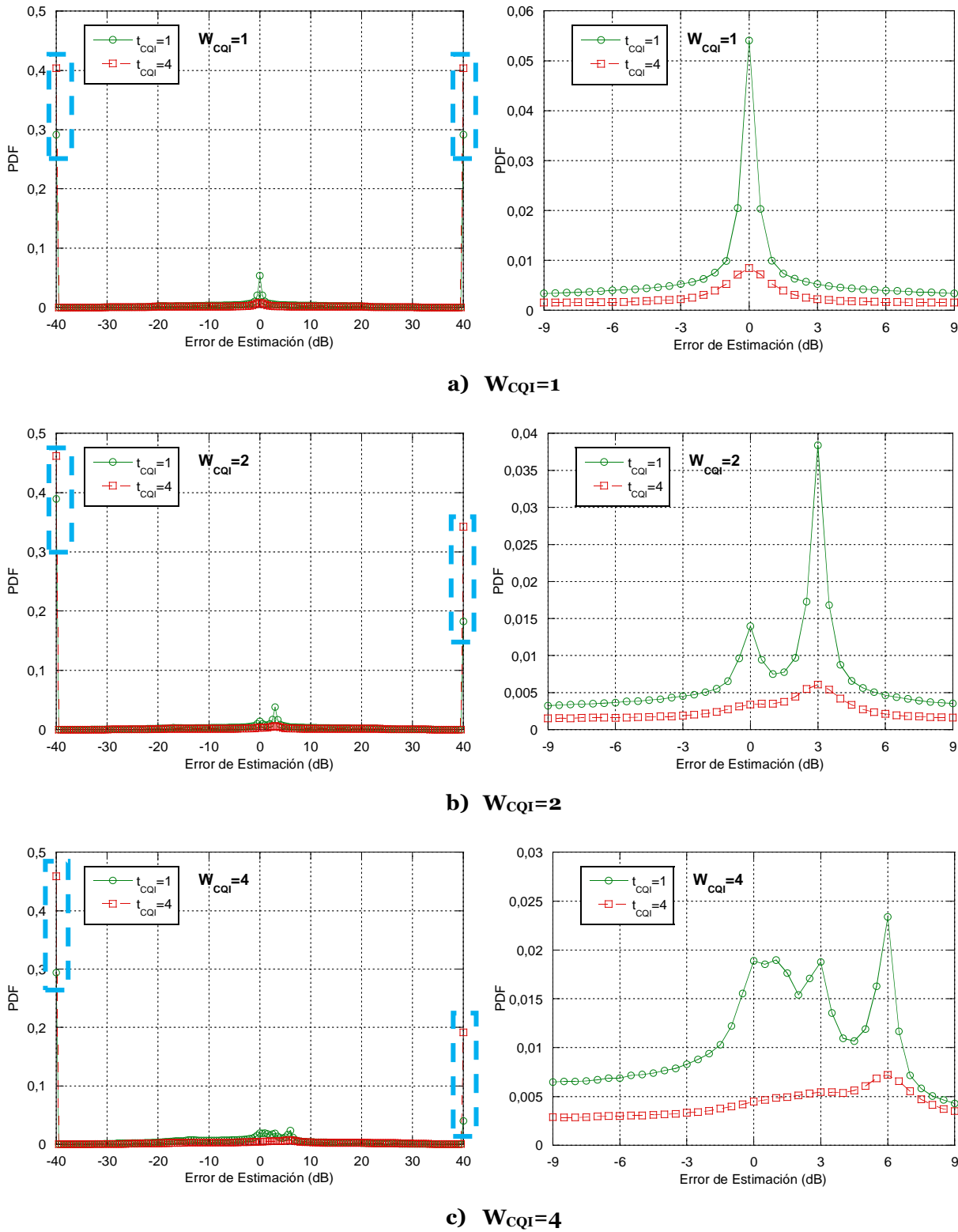


Figura 4.6: Error de interferencia en FFR para diferentes formatos de CQI

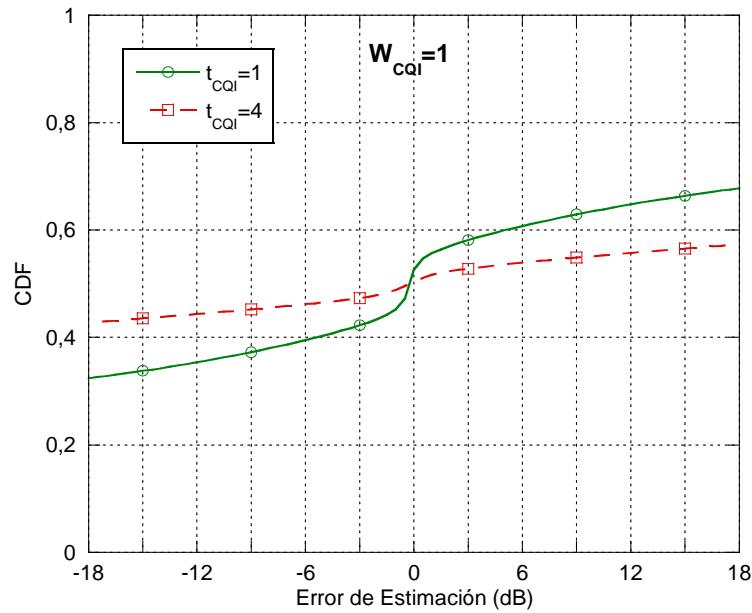


Figura 4.7: CDF del error de interferencia en FFR

Para el caso de $W_{CQI}=2$ y $W_{CQI}=4$ (Figura 4.6b y Figura 4.6c respectivamente) se reduce el número de ocasiones en las que el Error $\rightarrow +\infty$ puesto que al promediar varios TTIs, es más improbable que I_{pres} sea 0. El simple hecho de aplicar promediado a la hora de generar el CQI reduce por tanto el número de ocasiones en las que se produce la transición más perjudicial (OFF a ON). Con $W_{CQI}=2$, podemos apreciar que aparece un pico para un error de 3dB, es decir, cuando la interferencia observada es el doble que la estimada en el momento de realizar la asignación de recursos. Esto se debe a que al promediar 2 TTIs y dada la baja ocupación del sistema, en la mayor parte de las ocasiones se observa en el RB interferencia en un TTI y no interferencia en el otro TTI. I_{pres} tendrá por tanto un valor aproximado de la mitad del valor normal de interferencia. Del mismo modo se justifica el pico en 6dB (un factor por 4) para el caso de $W_{CQI}=4$. En este caso también se observan otros picos, como por ejemplo en 3dB, dado que al promediar 4 TTIs, hay un mayor número de combinaciones posibles para dar una I_{pres} no nula.

El Figura 4.8 muestra el error de estimación en el algoritmo *FFRo*. La ordenación aplicada en la asignación de RBs confina las transmisiones en

4.1 Análisis de la variabilidad de la ICI en sistemas FFR con diferentes (...)

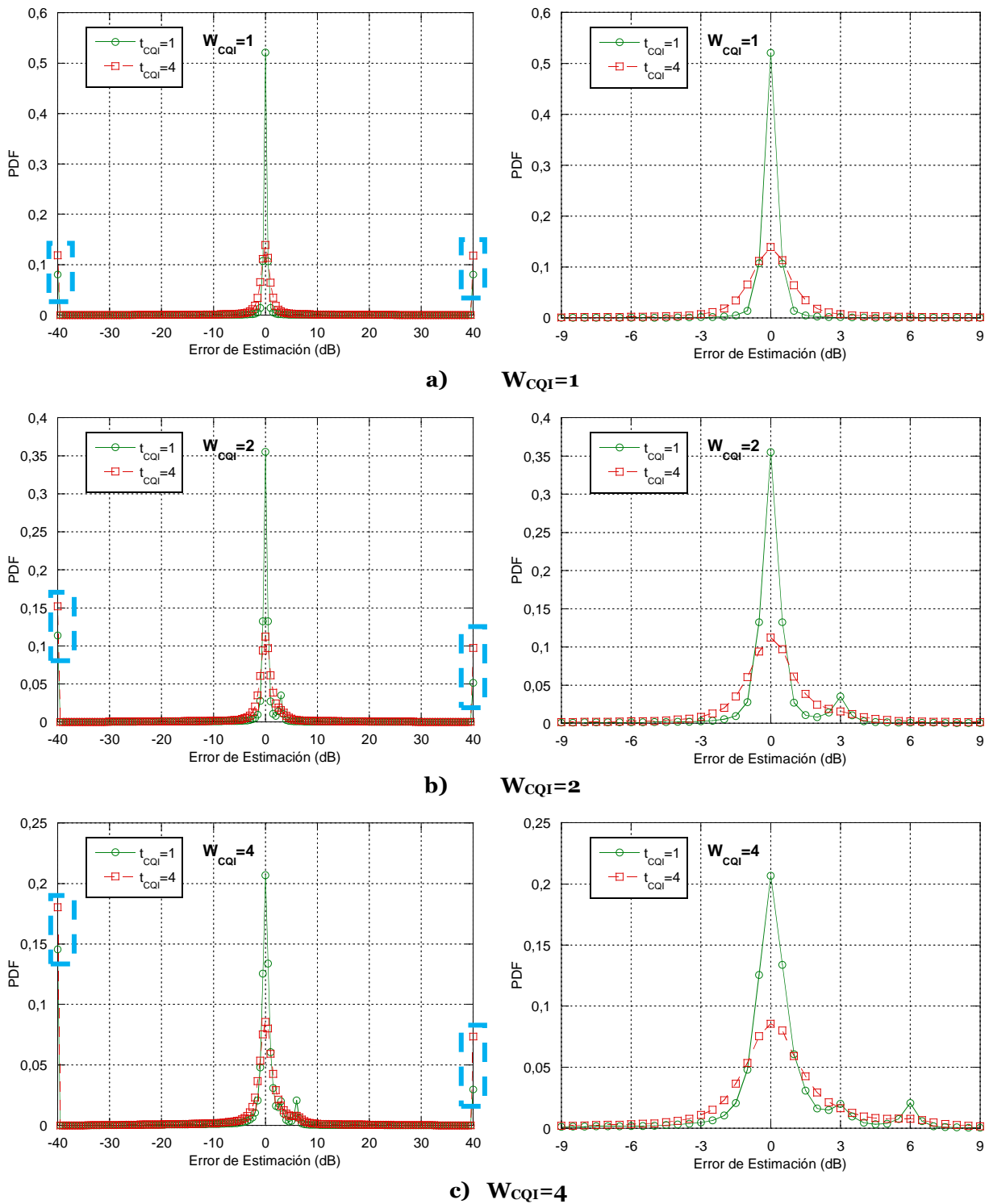


Figura 4.8: Error de interferencia en FFRo para diferentes formatos de CQI

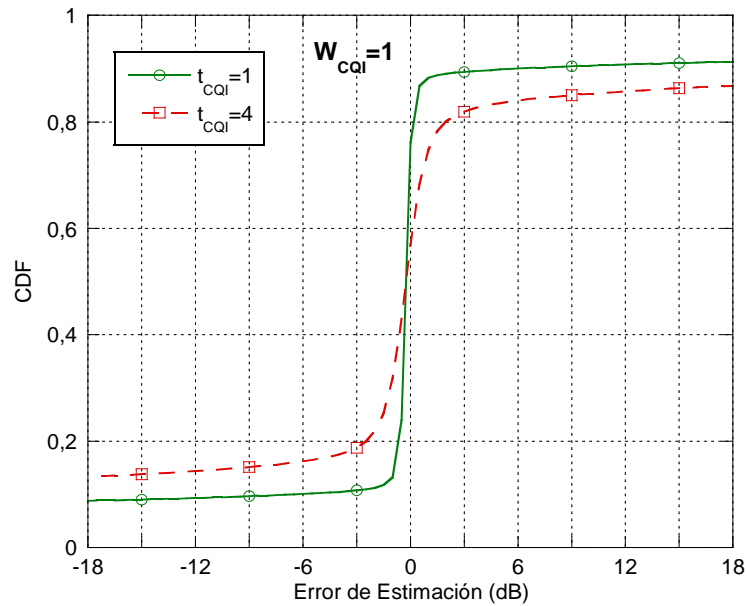


Figura 4.9: CDF del error de interferencia en FFRo

determinados RBs en condiciones de baja carga. Se reduce por tanto la aparición del efecto ON-OFF (los valores del error de interferencia en $\pm\infty$ son significativamente menores que en FFR) y la interferencia es más estable, estimándose con suficiente precisión incluso cuando se promedian varios TTIs y el retardo t_{CQI} es alto. De acuerdo con la Figura 4.9, cuando $t_{CQI}=1$, en el 80% de las ocasiones se logra un error inferior a 6dB, mientras que para $t_{CQI}=4$ este porcentaje se reduce hasta el 68% debido a que las medidas tienen 4 subtramas de antigüedad y describen con menor precisión el estado actual de la interferencia observada por el usuario. A diferencia de lo que sucedía en FFR, a medida que se aumenta W_{CQI} , el error de estimación sigue centrado principalmente en 0dB debido a que la interferencia es ahora mucho más estable gracias a la ordenación en la asignación de RBs. Aparecen también los picos secundarios en valores como 3dB o 6dB pero su ocurrencia es mucho menor que antes debido a que con FFRo es más difícil que existan subtramas en las que no se observe interferencia en un determinado RB.

A medida que la carga del sistema aumenta, se reducen las ocasiones en las que se produce el efecto ON-OFF porque resulta muy poco probable que un RB

quede sin asignar en todas las celdas vecinas. La estimación de la interferencia resultará así más precisa incluso para el algoritmo FFR, como se puede apreciar en la Figura 4.10, que representa el error en la estimación de la interferencia en FFR para el caso de 90 usuarios por celda (22,5 usuarios en promedio con tráfico activo o equivalentemente, un 83% de carga de la celda) con $t_{CQI}=1$ y $W_{CQI}=1$. En la gran mayoría de las ocasiones, el error de interferencia se sitúa próximo a cero y el número de ocasiones en las que se da un efecto ON-OFF es marginal. En este caso, el porcentaje de transmisiones que experimentan un error absoluto inferior a 6dB con FFR aumenta hasta el 78%, frente al 22% que se obtenía cuando la carga era del 16%.

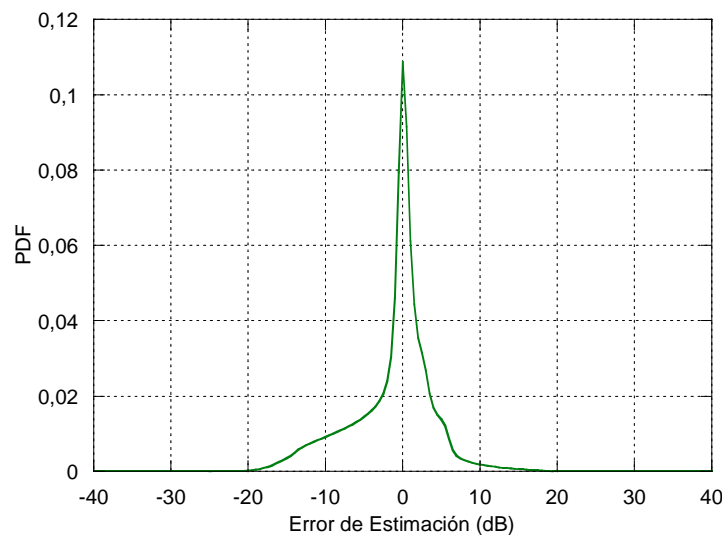


Figura 4.10: Error de interferencia en FFR con alta carga

4.1.3 Conclusiones

Las simulaciones recopiladas en este apartado muestran el error cometido en la estimación de las condiciones de interferencia en las que se encuentran los usuarios como resultado de la fuerte variabilidad de la interferencia en sistemas basados en FFR. El uso de promediado de varios TTIs para generar un CQI permite reducir el número de ocasiones en las que se da una transición de OFF a ON en la interferencia, que es el caso más perjudicial. Por otra parte, el uso de la

ordenación en la asignación reduce considerablemente la variabilidad de la interferencia, lo que permite obtener una estimación precisa incluso cuando los parámetros del mecanismo de CQI no son muy restrictivos. Este hecho permitirá realizar unas asignaciones de recursos más apropiadas, reduciendo el número de errores en la selección de RBs y MCSs.

4.2 Propuesta de algoritmos de asignación de recursos radio basados en el esquema FFR

Las propuestas que se presentan en este apartado se corresponden con un desarrollo completo de la gestión de recursos en redes OFDMA, que comprende la asignación de RBs, potencia y adaptación de tasa para satisfacer los requisitos de QoS de los distintos usuarios. La asignación de recursos frecuenciales y potencia seguirá principalmente los esquemas FFR y FFRo descritos anteriormente, sobre los que se aplicarán diversas modificaciones para dar soporte a la adaptación de tasa y provisión de QoS. Además, sobre el algoritmo FFRo se incorporará un mecanismo de asignación de potencia similar al descrito en el capítulo 3 para FFS_3LevelMask_Min, puesto que las simulaciones realizadas en dicho capítulo ponen de manifiesto su capacidad para mantener estable la interferencia. Esta solución de ordenación en la asignación de RBs y asignación de potencia basada en máscaras se denomina *FFRopa* y constituye la propuesta principal de este trabajo. Este algoritmo permite reducir significativamente la variabilidad de la interferencia que acarrea el esquema FFR gracias a la ordenación en la asignación de RBs, al tiempo que se incrementa la accesibilidad al sistema frente al esquema FFRo debido a una gestión dinámica de la potencia disponible en la celda.

En todos los algoritmos propuestos en este apartado se contempla la adaptación de la tasa asignada a cada usuario dependiendo de las condiciones de canal observadas y de la cantidad de datos en sus buffers. Tomando estos

factores en consideración, el scheduler asignará a cada conexión una determinada MCS dentro del subconjunto de MCSs posibles en el sistema, de modo que la tasa de BLER se mantenga en torno al valor deseado. Esta nueva variable ofrece una mayor versatilidad a la hora de asignar de recursos, lo que aumentará la capacidad del sistema para proporcionar la QoS demandada por los usuarios a costa de un aumento en la complejidad de los algoritmos de scheduling. Los algoritmos aquí presentados suponen por tanto una solución completa al problema de la asignación de recursos bajo un esquema FFR, puesto que las subportadoras, potencia y MCS son gestionadas conjuntamente para controlar eficientemente la interferencia creada por el sistema al tiempo que se proporciona la QoS que exigen los usuarios.

En este apartado se contemplará también la retransmisión de paquetes de datos erróneos por medio de un mecanismo de ARQ simple. De este modo se garantiza que el usuario recibe correctamente el flujo de datos. Por simplicidad y sin pérdida de generalidad, asumiremos que la estación base mantiene una única conexión de datos con cada usuario de la celda, resultando directa su extensión a un escenario con múltiples conexiones por usuario.

En cualquier caso, en este contexto de adaptación de tasa, se definirá una MCS objetivo para cada conexión k ($MCS_{obj,k}$), como la MCS mínima que permite transmitir una cierta cantidad de datos B en un número n_k de RBs. Es decir, el objetivo inicial de la preasignación de recursos es otorgar al usuario un número n_k de RBs tal que pueda satisfacerse su requisito de tasa de transmisión nominal objetivo ($T_{obj,k}$), mediante el uso de la $MCS_{obj,k}$, en lugar de la MCS más alta del sistema. Se evita de este modo el uso reiterado de MCSs elevadas, que son más propensas a sufrir un mayor BLER, cuando el usuario puede satisfacer su tasa requerida en el mismo número de RBs y con una MCS menor. Los algoritmos permiten también el uso de una MCS más baja ocupando un mayor número de RBs para poder así alcanzar a los usuarios del exterior de la celda y

lograr estos su tasa requerida. Adicionalmente, se contempla el incremento de la tasa de transmisión por encima de la tasa objetivo por medio de la asignación de múltiples RBs a los usuarios o de mejoras de la MCS, con el fin de agilizar la transmisión de los paquetes acumulados en el buffer de acuerdo con la priorización de conexiones otorgada por la estrategia de scheduling temporal aplicada.

Por otra parte, para gestionar el hecho de que la tasa asignada en cada TTI puede ser variable, se crea el concepto de *unidad de transporte* (TU: *Transport Unit*), definido como el número de bits de información que se envían cuando un RB se transmite con la MCS más baja del sistema. Por tanto, un TU es la unidad mínima de datos que se puede asignar a una conexión. Cada nuevo paquete generado en la conexión se divide en un número entero de TUs que se almacenan en el buffer de salida. Los TUs son tratados de forma independiente durante la fase de scheduling, es decir, en un RB pueden transmitirse TUs de distintos paquetes. Cuando un RB es recibido con errores debido a efectos del canal, todos los TUs transmitidos en él se consideran erróneos y deberán retransmitirse

4.2.1 Algoritmos basados en FFR para la asignación de recursos

A continuación se detallan los algoritmos propuestos para la asignación de subportadoras, potencia y MCS bajo un esquema de coordinación de interferencias FFR. Se van a analizar dos posibilidades para la gestión de la prioridad de las conexiones:

- *Prioridad por HoL*: este es el esquema seguido en las simulaciones anteriores. La prioridad de cada conexión es calculada al principio del TTI en base al paquete cabecera de cola (HoL), y se mantiene invariante durante todo el procedimiento de asignación. Si tras una primera asignación a todas las conexiones todavía existen conexiones con datos

pendientes, se pueden asignar más recursos siguiendo el mismo orden de prioridad obtenido al inicio del TTI.

- *Prioridad dinámica:* cada vez que se produce una preasignación de recursos dentro de un TTI, se recalcula la prioridad de la conexión afectada, se reordenan todas las conexiones y se continúa con la siguiente asignación de acuerdo con las nuevas prioridades. Esto significa que si el índice de prioridad así lo exige, una misma conexión puede recibir varios RBs antes de poder pasar a asignar recursos a la siguiente, lo que permite un seguimiento más preciso de la QoS ofrecida a los usuarios.

Cuando una conexión precisa un mayor número de recursos para transmitir más datos y recuperar así retrasos en sus buffers, se consideran dos estrategias:

- *Asignar un RB adicional:* las conexiones con datos pendientes en sus buffers después de la primera asignación recibirán un RB adicional para transmitir una mayor cantidad de datos. Todos los RBs asignados a una conexión dentro de la misma subtrama deberán utilizar la misma MCS con el fin de reducir la señalización necesaria. Al asignar un RB nuevo con la MCS asignada inicialmente, puede darse el caso de que la nueva tasa asignada sea mayor que el número de TUs actualmente en los buffers. En este caso, se reducirá la MCS de todos los RBs del usuario siempre y cuando la tasa lograda con este RB adicional sea superior a la que conseguía el usuario con la asignación previa.
- *Priorizar el uso de MCS elevadas:* antes de asignar un RB adicional y siempre que las condiciones radio lo permitan, el scheduler intentará asignar una MCS más eficiente a las conexiones con datos pendientes para aumentar así su tasa cursada. Para ello, la SINR alcanzable en recepción debe ser superior a la SINR umbral de la nueva MCS. En caso de no ser posible, se intentará la asignación de un RB adicional tal y como se ha descrito antes. El objetivo de esta opción es ocupar el menor número posible de RBs para asignar usuarios con buenas condiciones de

canal, de modo que se reserven RBs para aumentar el número de usuarios que se pueden servir por TTI.

4.2.1.1 Esquema FFR_{opa}

En este apartado se detalla el esquema FFR_{opa}, que es la propuesta principal de esta tesis para la asignación de recursos radio en redes móviles de banda ancha OFDMA. El algoritmo FFR_{opa} parte de un esquema FFR con subbanda exterior sectorizada sobre el que se aplica, de forma similar al esquema FFR_o antes descrito, una ordenación en la asignación de RBs de la subbanda interior para de este modo combatir el impacto de la variabilidad de la ICI y el efecto ON-OFF de la interferencia. Para recapitular, los RBs de la subbanda interior se dividen en tres subbandas cada una de las cuales se preasigna a un sector de la celda. Los RBs son asignados en cada sector a sus usuarios siguiendo un ordenamiento circular y con diferente decalado entre celdas vecinas (ver Figura 4.3 para un ejemplo gráfico). De este modo, en condiciones de baja carga se consigue que los RBs ocupados por los distintos sectores en subtramas consecutivas presenten pocas variaciones, resultando en una interferencia más estable y predecible. Se define al igual que en FFR_o un grupo inicial de SG RBs que se asignan sin seguir la ordenación para evitar el bloqueo en el acceso a los recursos frecuenciales cuando se asignan los primeros RBs de cada sector. Cuando un sector ha asignado todos los RBs de su subbanda preasignada comienza a ocupar RBs de otros sectores siguiendo el mismo ordenamiento para contener la interferencia. El sector del que se ocupan RBs es aquel que tiene un menor número de conexiones con datos pendientes, es decir, el que en teoría asignará menos RBs.

El esquema FFR_{opa} incorpora también un mecanismo de asignación dinámica de potencia que hace uso de tres máscaras de potencia, tal y como se definió en el capítulo 3 para el algoritmo FFS_3LevelMask_Min. Una primera máscara, la máscara media (M_{med}), determina el valor de potencia transmitida

en cada RB de modo que la potencia total transmitida por la celda sea igual a la potencia máxima de transmisión de la misma (P_T^{max}). Con el fin mejorar la accesibilidad en la subbanda interior, la potencia de transmisión en el RB podrá ajustarse a las condiciones de canal en las que se encuentra el usuario, de modo que si la potencia requerida por un usuario es inferior a esta máscara media, se obtenga un margen de potencia que se reinvierte en asignar a usuarios cuya potencia requerida exceda la máscara media. Lógicamente, este ajuste de la potencia de transmisión implica un incremento en la variabilidad de la ICI. Para controlarlo, se definen dos máscaras más, la máscara mínima (M_{min}) y la máscara máxima (M_{max}), que delimitan el rango de valores que puede tomar la potencia de transmisión en el RB.

Un ejemplo gráfico de este esquema de asignación dinámica de potencia puede encontrarse en la Figura 4.11. Asumiendo que un usuario k tiene una MCS objetivo $MCS_{obj,k}$, la SINR umbral que debe lograr en recepción es $SINR_{k,req}$. La potencia de transmisión requerida entonces por el usuario en un RB i ($P_{k,i}$) se calcula por inversión de canal como se describió en la ecuación (3.11) de acuerdo con los valores de pérdidas de canal, interferencia y ruido indicados por el usuario a través de CQIs. Los usuarios que exigen una potencia inferior a la máscara media (usuarios 0, 2 y 3 en la Figura 4.11) crean un margen de potencia igual a $M_{med}-P_{k,i}$ al ser preasignados con dicha potencia, que es utilizado para asignar recursos a los usuarios que exceden el valor de la máscara media sin superar la máscara máxima (usuarios 1 y 4).

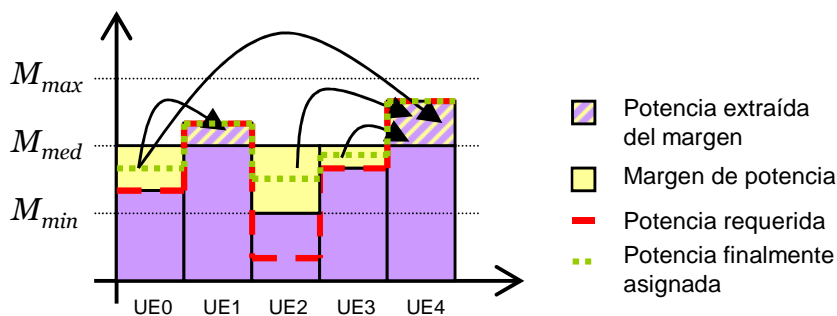


Figura 4.11: Asignación dinámica de potencia en FFRopa

La máscara mínima limita el valor de potencia más bajo que puede asignarse a un usuario. Así, un usuario que requiera una potencia inferior a la máscara mínima, será preasignado con una potencia igual a dicha máscara (usuario 2 en la Figura 4.11). Esta limitación reduce el margen de potencia disponible para asignar a usuarios con mayores demandas de potencia, pero permite mantener bajo control las fluctuaciones en la ICI debidas a la asignación de potencia de transmisión. Cuando un usuario excede el valor de la máscara máxima en todos los RBs asignables o no hay margen suficiente de potencia para ser asignado, el algoritmo aplica una fase de renegociación de las preasignaciones por la que los usuarios pueden ser desplazados a otros RBs de modo que se libere algún RB hábil para el usuario o se incremente el margen de potencia disponible y de este modo el nuevo usuario pueda recibir recursos. Si esta renegociación no resulta exitosa, se intentará asignar al usuario en la subbanda exterior. En dicha subbanda no se aplica adaptación de potencia puesto que se persigue mantener una interferencia lo más estable posible para mejorar las prestaciones de los usuarios exteriores.

Aunque el margen de potencia puede obtenerse directamente al preasignar a los usuarios, se ha considerado más adecuado obtener el margen de potencia realmente requerido proporcionalmente al margen de potencia que experimenta cada usuario, de modo que más potencia se extraerá del usuario con mejores condiciones de canal. El margen de potencia alcanzable se actualiza cada vez que un usuario con potencia requerida inferior a M_{med} es asignado. Sin embargo, ese margen no se elimina directamente de la potencia del usuario, sino que se le asigna preliminarmente un valor M_{med} . Los usuarios cuya potencia exceda la máscara media serán asignados cuando su exceso de potencia ($P_{k,i} - M_{med}$) sea inferior al margen de potencia creado por las asignaciones anteriores. El margen de potencia se actualiza entonces descontando este exceso de potencia. Cuando no sea posible realizar más asignaciones, bien porque no queden datos pendientes de transmitir o no haya más recursos disponibles, se aplica el paso

final para la asignación definitiva de la potencia: si la potencia final asignada no excede la P_T^{max} , se dan por definitivas las preasignaciones realizadas. Este caso se da cuando no existen usuarios con potencia requerida superior a la máscara media o cuando quedan RBs sin ser asignados, con lo que el exceso de potencia de los usuarios en peores condiciones se obtiene de la potencia no asignada en dichos RBs. Puede suceder por tanto que muchos usuarios reciban una potencia igual a la máscara media aunque su potencia requerida sea menor debido a que no sea necesario extraer el margen. Por el contrario, en el caso de que las preasignaciones realizadas excedan el valor P_T^{max} , es necesario detraer potencia de los usuarios con mejores condiciones para compensar el exceso de potencia consumida. Tal y como se ha comentado anteriormente, para realizar unas asignaciones más equitativas se ha optado por extraer potencia de forma proporcional al margen que disfruta cada usuario. Así, en el ejemplo de la Figura 4.11, la potencia finalmente asignada se marca con una línea punteada. Se detrae más potencia del usuario 2 puesto que es el que disfruta de un mayor margen de potencia.

Sobre la base de este esquema FFRopa se han desarrollado cuatro algoritmos que combinan las dos estrategias contempladas de gestión de la prioridad de las conexiones con los dos modos de asignación de recursos adicionales para las conexiones con datos pendientes en sus buffers. Así, en primer lugar se describe el algoritmo FFRopa-RB, en el que las conexiones con tráfico pendiente en sus buffers pueden recibir un RB adicional para recuperar el retraso en el servicio. Cuando se aplica una priorización por HoL hablamos del algoritmo *FFRopa-RB_PriHoL*. Análogamente, para el caso de prioridad dinámica, hablamos del algoritmo *FFRopa-RB_PriDin*. Posteriormente, se apuntarán las matizaciones introducidas en los algoritmos para priorizar la mejora de la MCS preasignada antes de asignar RBs adicionales. Para distinguirlos de los anteriores, estos esquemas se identificarán como *FFRopa-MCS_PriHoL* y *FFRopa-MCS_PriDin*.

FFRopa-RB PrioHoL

Este algoritmo consiste en los siguientes pasos:

- Paso 1 Determinar el tamaño del grupo inicial de RBs asignables de forma no ordenada de acuerdo con el número de RBs asignados a las conexiones de cada sector en la subbanda anterior.
- Paso 2 Calcular para cada conexión k la MCS objetivo que se intentará satisfacer en primer lugar ($MCS_k=MCS_{obj,k}$) de acuerdo con su tasa de satisfacción objetivo ($T_{obj,k}$) y el número de RBs necesarios inicialmente (n_k) para servir dicha tasa.
- Paso 3 Calcular para cada flujo de datos la prioridad de asignación P_k del paquete HoL de cada conexión k . Ordenar la lista de conexiones activas de forma decreciente de acuerdo con la prioridad de asignación P_k .
- Paso 4 Mientras existan RBs libres, asignar a cada conexión RBs del grupo inicial en los que mejores condiciones de canal experimenten haciendo uso del mecanismo de asignación dinámica de potencia antes descrito. Asumamos que por orden de prioridad debe recibir servicio la conexión k . Si ya no quedan RBs libres en el grupo inicial del sector al que pertenece la conexión, saltar al paso 5. En caso contrario, proseguir como se describe:

Paso 4.1: Asignar n_k RBs libres del grupo inicial del sector al que pertenece la conexión k en los que se pueda utilizar la MCS_k que se intenta alcanzar (inicialmente, $MCS_k=MCS_{obj,k}$). Si se produce la asignación, volver al paso 4 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 4.2: Intentar una renegociación de las asignaciones anteriormente realizadas del grupo inicial del sector desplazando las

preasignaciones de otras conexiones a RBs libres del grupo inicial, para poder asignar recursos a la nueva conexión. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 4 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 4.3: Intentar la asignación de la conexión k en la subbanda exterior de su sector con la MCS_k elegida. Si se produce la asignación, volver al paso 4 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

Paso 4.4: Renegociar las preasignaciones realizadas tanto en el grupo inicial del sector como en su subbanda exterior. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 4 con la siguiente conexión por orden de prioridad. En caso contrario, repetir el paso 4 con la misma conexión k pero asumiendo que requiere un RB más ($n_k = n_k + 1$) para transmitir su tasa requerida, recalculándose la nueva MCS que se intentará utilizar (MCS_k).

Paso 5 Cuando todos los RBs del grupo inicial del sector al que pertenece la conexión k han sido asignados, se continúa asignando los RBs de la subbanda preasignada al sector siguiendo la ordenación marcada por la coordinación. Si todos los RBs de la subbanda preasignada al sector ya se han asignado, se ocupan RBs de las subbandas de otros sectores como se ha descrito anteriormente. En concreto, se intenta asignar el primer RB libre (siguiendo la ordenación en la asignación de RBs) del sector con menor número de conexiones con tráfico pendiente. En cualquiera de los dos casos, se aplican 4 intentos de asignación análogos a los descritos en el paso anterior utilizando también el mecanismo de asignación dinámica de potencia. Volver al paso 4 con la siguiente conexión por orden de prioridad.

- Paso 6 Una vez que todas las conexiones han recibido una oportunidad de asignación y mientras queden RBs libres, se va a intentar asignar un RB adicional a cada conexión que disponga de tráfico pendiente en sus buffers, con el mismo orden de prioridad obtenido al inicio del algoritmo en el paso 3. El procedimiento a seguir es análogo al descrito en los pasos 4 y 5, intentando la asignación del RB adicional primero en la subbanda interior y luego en la exterior, y asumiendo que el nuevo RB debe utilizar la misma MCS_k asignada en los RBs anteriores. En caso de que la nueva asignación no sea posible incluso con renegociaciones, se contempla la reducción de la MCS_k en todos los RBs asignados al usuario para asignar el RB adicional, siempre y cuando dicha MCS inferior permitiera transmitir un número entero de TUs en los (n_k+1) RBs asignados (los asignados en el paso 4 o 5 más el RB adicional) y que además, la tasa lograda con esta nueva asignación sea superior a la asignación previa realizada en el paso 4 o 5. En caso de que no exista tal MCS, se mantienen las asignaciones previas a esta conexión y se vuelve al paso 6 con la siguiente conexión por orden de prioridad.
- Paso 7 En este paso se evalúa la potencia total consumida por la celda en las asignaciones realizadas y en caso de que exceda P_T^{max} , se aplica el mecanismo antes descrito para tomar potencia de los usuarios con mejores condiciones de canal de forma proporcional a estas.
- Paso 8 Finalmente, en este paso se va a mejorar la MCS de aquellas conexiones con tráfico pendiente en sus buffers y que no recibieron ningún RB adicional en el paso 6. Así, mientras las condiciones de canal lo permitan, se mejorará la MCS asignada en los RBs de la conexión cuando su SINR sea mayor que la SINR umbral de la nueva MCS en todos ellos y tenga suficientes datos pendientes en los buffers como para llenar la tasa transmitida con la nueva MCS.

FFRopa-RB PrioDin

En este caso, el algoritmo puede redefinirse como sigue:

- Paso 1 Determinar el tamaño del grupo inicial de RBs asignables de forma no ordenada de acuerdo con el número de RBs asignados a las conexiones de cada sector en la subbanda anterior.
- Paso 2 Calcular para cada conexión k la MCS objetivo que se intentará satisfacer en primer lugar ($MCS_k = MCS_{obj,k}$) de acuerdo con su tasa de satisfacción objetivo ($T_{obj,k}$) y el número de RBs necesarios inicialmente (n_k) para servir dicha tasa.
- Paso 3 Calcular para cada conexión k la prioridad de asignación P_k del paquete HoL. Ordenar la lista de conexiones activas de forma decreciente de acuerdo con la prioridad de asignación P_k .
- Paso 4 Mientras existan RBs libres, asignar a la conexión con el TU más prioritario los RBs del grupo inicial en los que mejores condiciones de canal experimenten haciendo uso del mecanismo de asignación dinámica de potencia antes descrito. Siempre que se produzca la asignación de algún RB, actualizar la prioridad de las conexiones y reordenar la lista de conexiones de acuerdo con la prioridad del nuevo TU situado en la cabecera del buffer. Asumamos que el TU más prioritario pertenece a la conexión k . Si ya no quedan RBs libres en el grupo inicial del sector al que pertenece la conexión, saltar al paso 5. En caso contrario, proseguir como se describe:

Paso 4.1: Asignar n_k RBs libres del grupo inicial del sector al que pertenece la conexión k en los que se pueda utilizar su MCS_k . Si se produce la asignación, volver al paso 4.

Paso 4.2: Intentar una renegociación de las asignaciones anteriores del grupo inicial del sector desplazando las

preasignaciones de otras conexiones a RBs libres del grupo inicial, para poder asignar recursos a la nueva conexión. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 4.

Paso 4.3: Intentar la asignación de la conexión k en la subbanda exterior de su sector con la MCS_k . Si se produce la asignación, volver al paso 4.

Paso 4.4: Renegociar las preasignaciones realizadas tanto en el grupo inicial del sector como en su subbanda exterior. Si la renegociación es exitosa, volver al paso 4. En caso contrario, si la conexión **no** ha recibido una asignación ya en esta subtrama, se asume que la conexión k requiere un RB más ($n_k = n_k + 1$) para cursar su tasa objetivo, se calcula la nueva MCS (MCS_k) y se repite el paso 4 (no es necesario recalcular prioridades puesto que no ha habido una asignación). Por el contrario, si **sí** había recibido algún RB previamente (se está asignando entonces un RB adicional), se reduce la MCS preasignada en todos los RBs de la conexión y se repite el paso 2 para esta conexión k . Si al reducir la MCS se obtuviera una tasa igual o inferior a la actualmente conseguida con las asignaciones previas realizadas, se mantiene la asignación anteriormente realizada y se vuelve al paso 4 tomando el siguiente TU en orden de prioridad.

Paso 5 Cuando todos los RBs del grupo inicial del sector han sido asignados, se continúa asignando los RBs de la subbanda preasignada al sector al que pertenece la conexión k siguiendo la ordenación marcada por la coordinación. Si todos los RBs de la subbanda preasignada al sector ya se han asignado, se ocupan RBs de las subbandas de otros sectores. En concreto se intenta asignar el primer RB libre (siguiendo la ordenación en la asignación de RBs) del sector con menor número

de conexiones con tráfico pendiente. En cualquiera de los dos casos, se aplican los 4 intentos de asignación descritos en el paso anterior: primero en la subbanda interior y posteriormente en la exterior, haciendo uso de la renegociación si es necesario. Volver al paso 4.

Paso 6 Realizar el ajuste de la potencia asignada a cada usuario de acuerdo con el mecanismo descrito anteriormente.

Paso 7 Mejorar la MCS de aquellas conexiones con tráfico pendiente en sus buffers mientras las condiciones de canal lo permitan. Solo se consideran en este paso las conexiones cuya tasa asignada en esta subtrama sea igual a su tasa requerida, puesto que el resto de conexiones han sido capaces de aumentar su tasa cursada recibiendo RBs adicionales.

FFRopa-MCS

Como se ha dicho anteriormente, este esquema prioriza la mejora de la MCS preasignada antes de asignar RBs adicionales para incrementar la tasa servida a los usuarios. El objetivo es reducir el número de RBs ocupados para permitir el acceso a un mayor número de usuarios. Sin embargo, estas MCSs más eficientes exigen una SINR más elevada, con lo que son más sensibles a las variaciones del canal y el BLER puede ser mayor.

Dependiendo de la estrategia de cálculo de prioridad considerado, podemos hablar de los algoritmos *FFRopa-MCS_PriHoL* y *FFRopa-MCS_PriDin*. En esencia, estos algoritmos son similares a los anteriores *FFRopa-RB_PriHoL* y *FFRopa-RB_PriDin* salvo que cuando una conexión va a recibir recursos adicionales (ya ha recibido una asignación previa en el TTI), el scheduler intentará en primer lugar mejorar la MCS preasignada para incrementar la tasa cursada. Para ello, la conexión deberá cumplir con los requisitos de SINR de la nueva MCS en el RB o RBs que haya recibido y además deberá disponer de

suficientes datos en los buffers como para rellenar la nueva tasa ofrecida. Se asume también que el algoritmo extraerá potencia del margen existente en caso de que sea necesario para alcanzar a la potencia de transmisión requerida con la nueva MCS. En caso de que no cumpla con alguno de estos requisitos, se probará la asignación con una MCS inferior, y así sucesivamente hasta llegar a la MCS que fue asignada inicialmente. Si la mejora de MCS no puede llevarse a cabo finalmente, se intentará incrementar la tasa servida al usuario asignando RBs adicionales, es decir, de forma similar a su correspondiente versión FFR_{opa}-RB.

4.2.1.2 Algoritmos más simples basados en FFR y FFR_o

Las estrategias de asignación descritas para el esquema FFR_{opa} pueden también ser aplicadas a los esquemas FFR y FFR_o, que fueron descritos para la evaluación del apartado 4.1.1.1. Podemos hablar por tanto para FFR_o de cuatro algoritmos distintos (*FFR_o-RB_PriHoL*, *FFR_o-RB_PriDin*, *FFR_o-MCS_PriHoL* y *FFR_o-MCS_PriDin*) directamente heredados de sus versiones FFR_{opa}. En estos algoritmos no se aplica el mecanismo de asignación dinámica de potencia detallado anteriormente, sino que todas las asignaciones se realizan asumiendo una potencia de transmisión en el RB igual a la máscara media. Es esperable que esta opción limite en cierto grado la accesibilidad al sistema debido a que se restringen las libertades del scheduler. Del mismo modo, se pueden definir otros cuatro algoritmos basados en FFR (*FFR-RB_PriHoL*, *FFR-RB_PriDin*, *FFR-MCS_PriHoL* y *FFR-MCS_PriDin*) en los que además no se considera la ordenación en la asignación de recursos frecuenciales de la subbanda interior, por lo que como hemos visto anteriormente, se obtendrá una mayor variabilidad en la ICI que afectará a las prestaciones del algoritmo. Estos ocho esquemas más simplificados se utilizarán también en las evaluaciones posteriores y permitirán analizar con mayor detalle la ganancia real obtenida por el esquema FFR_{opa} propuesto en esta tesis.

4.2.2 Condiciones de simulación

Las simulaciones presentadas en este apartado tienen como objetivo evaluar los límites de operación del sistema a nivel de paquete, esto es, los límites de la región de scheduling de los algoritmos presentados determinando el número máximo de conexiones activas tal que se aseguren los parámetros de calidad de servicio a nivel de paquetes (en este caso de forma genérica a través de la tasa de descarte). Queda fuera de este trabajo la consideración del dinamismo del sistema a nivel de conexión (establecimiento y liberación de nuevas conexiones) y tampoco se aplica ningún tipo de procedimiento de control de admisión o congestión.

Las prestaciones ofrecidas por los algoritmos propuestos se evaluarán para un número variable de usuarios fundamentalmente en base a las siguientes métricas:

- *Tasa de descarte de TUs*: es el porcentaje de TUs descartados por exceder el retardo máximo permitido del servicio ($D_{max,k}$) sin haber sido recibidos correctamente por el UE. Como criterio de calidad, vamos a suponer una tasa de descarte objetivo del 1%, lo que determinará la capacidad de la celda en términos del número de conexiones soportadas por el sistema.
- *Retardo promedio de TUs*: mide el número promedio de TTIs transcurridos desde que un nuevo TU es generado hasta su correcta recepción por parte del usuario. Lógicamente, este valor incluye todas las posibles retransmisiones necesarias hasta recibir correctamente los datos.
- *Tasa de error en el bloque o BLER*: determina el porcentaje de bloques de datos (RBs) que se han recibido erróneamente y que por tanto, deben ser retransmitidos.

El modelo de sistema utilizado en las simulaciones siguientes es similar al que se ha venido utilizando a lo largo de esta tesis, cuyos parámetros principales se recopilan en la Tabla 4.2. Los algoritmos propuestos contemplan el ajuste de la tasa transmitida de los usuarios, para lo que se han definido un total de 6 MCSs en el sistema. Los requisitos de SINR promedio de cada MCS, computados de modo que la tasa de BLER promedio sea del 10%, se muestran también en dicha tabla. De acuerdo con el estándar LTE en cuanto a la capa física [TS36.211, 2009], cada RB contiene 120 subportadoras dedicadas a la transmisión de datos, descontando las subportadoras que transportan canales comunes de control y las subportadoras piloto. Con estos números es posible determinar la tasa cursada en un RB por cada una de las MCSs del sistema, tal y como se recoge en la Tabla 4.2. Atendiendo a dicho valores podemos determinar que el tamaño del TU, definido como la unidad de tasa mínima asignable en el sistema, corresponde con la tasa cursada en un RB con la MCS mínima, es decir, 120 bits. Los valores de la máscara media se mantienen con respecto al apartado anterior pero se añaden en este caso las máscaras máxima y mínima para el caso de FFRopa, definidas como una diferencia de ± 3 dB con respecto a la máscara media.

Para analizar el comportamiento en diferentes condiciones de carga del sistema, las simulaciones se han realizado con un número variable de usuarios en la celda aunque en todos los casos, los usuarios se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo del área de cobertura. Para clasificar a los usuarios en función de su localización utilizaremos nuevamente el concepto de *zona*: el área de cobertura de la celda se divide en tres regiones concéntricas de igual área denominadas zonas, siendo la zona 0 la situada más próxima a la BS y la zona 2 la región más alejada de ella. Los usuarios se desplazan a una velocidad de 3km/h dentro de su propio sector para evitar handovers. A su vez, su dirección de desplazamiento se modifica cada segundo de acuerdo con un ángulo entre

Tabla 4.2: Parámetros generales del sistema

Modelo del sistema						
Despliegue celular	19 celdas trisectorizadas					
Distancia entre BSs	1732m					
Frecuencia central	2.5GHz					
Ancho de banda del sistema	5MHz					
Número de RBs	27					
Tamaño del RB	12 subportadoras x 1 TTI (1ms)					
Modelo de propagación	$128.1+37.6\log_{10}(d(\text{km}))$					
Desviación típica del shadowing (σ)	8dB					
Distancia de correlación del shadowing	50m					
Correlación del shadowing entre celdas	0.5					
Potencia de ruido	-174dBm/Hz					
Figura de ruido del receptor	5dB					
Modelo de canal (3km/h)	Extended Pedestrian-A					
Modelo Doppler	Jakes					
Potencia máxima de transmisión	43dBm					
Potencia máxima de transmisión por RB	32dBm					
Ganancia de antena en la BS	15dB					
Patrón horizontal de la antena de la BS	70deg (-3dB) con 20dB de relación delante-atrás					
Ganancia de diversidad en transmisión	3dB					
Ganancia de antena en el UE	0dB					
Ganancia de diversidad en recepción	3dB					
Modelo de tráfico ON-OFF						
Factor de actividad	25%					
Tiempo medio en el estado ON (T_{ON})	30ms					
Tiempo medio en el estado OFF (T_{OFF})	90ms					
Tamaño del paquete de datos (L)	240 bits					
Cota máxima de retardo ($D_{max,k}$)	50ms					
Tamaño del TU	120 bits					
Esquema de retransmisiones TUs						
Retardo de ARQ (Δ_{ARQ})	6ms					
Número máximo de retransmisiones (n_{tx})	4					
Esquema de CQI						
Tiempo entre CQIs (T_{CQI})	1ms					
Ventana de promediado de CQI (W_{CQI})	4ms					
Retardo de CQIs (Δ_{CQI})	2ms					
MCSs						
Índice de MCS	0	1	2	3	4	5
Configuración	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 1/2	64QAM 3/4
Bits de información por RB	120	180	240	360	480	540
SINR umbral	5.2dB	9dB	12.5dB	16.4dB	22.4dB	24.5dB
Máscaras de potencia (dBm/RB)						
Máscara	M_{med}		M_{min}		M_{max}	
Subbanda interior	26dBm/RB		23dBm/RB		29dBm/RB	
Subbanda exterior	31dBm/RB		31dBm/RB		31dBm/RB	

$\pm\pi/2$ elegido mediante una variable uniforme. Para indicar el estado del canal, los usuarios aplican un mecanismo de CQI con los parámetros mostrados en la Tabla 4.2.

Sin pérdida de generalidad asumiremos que cada usuario mantiene una única conexión de datos con su BS. El servicio de datos en el downlink se modela como al inicio de este capítulo por medio de un modelo ON-OFF con factor de actividad del 25%. Los tiempos de permanencia en el estado ON y OFF se modelan por medio de una variable aleatoria exponencial con media T_{ON} (30ms) y T_{OFF} (90ms) respectivamente. Durante el estado ON, la fuente de tráfico genera un nuevo paquete de datos de $L=240$ bits cada TTI (1ms), por lo que esta será la tasa objetivo a asignar a cada usuario ($T_{obj,k}$). Así, la MCS objetivo inicial a considerar en los distintos algoritmos es la MCS2, puesto que permite transmitir la tasa objetivo en un único RB ($n_k=1$).

Por otro lado, en estas simulaciones se incorpora un mecanismo de ARQ para la retransmisión de TUs erróneos: cuando un TU es recibido de forma errónea por el usuario, este es almacenado en un buffer especial de ARQ. Existe un tiempo T_{ARQ} que el paquete debe permanecer en el buffer de ARQ antes de poder ser retransmitido. Este tiempo modela el hecho de que ha de pasar un tiempo desde que se transmite un TU hasta que el usuario lo procesa, envía el correspondiente NACK y finalmente está a disposición del scheduler para su retransmisión. De acuerdo con la bibliografía, este valor de retransmisión se puede fijar en sistemas LTE en $T_{ARQ}=6ms$. Del mismo modo, con el fin de evitar que el mecanismo de ARQ bloquee la comunicación con sucesivas retransmisiones del mismo bloque de datos, se ha fijado un límite máximo de $n_{tx}=4$ retransmisiones, con lo que un TU es descartado del sistema cuando su cuarta retransmisión es recibida erróneamente.

Para analizar la capacidad de los algoritmos propuestos para garantizar la QoS en términos de retardo de paquetes, se ha fijado un valor máximo de retardo para la recepción correcta de los TUs igual a $D_{max,k}=50ms$, tiempo tras el cual el TU es descartado. Por tanto, la tasa de descarte de TUs es una métrica directa de la capacidad del algoritmo de scheduling para garantizar la QoS demandada por los usuarios. Como criterio de scheduling temporal se va a aplicar nuevamente el criterio Tasa, fijándose la tasa de satisfacción del usuario a su tasa objetivo:

$$k^* = \arg \min_k \frac{T_k [n]}{T_{obj,k}} \quad (4.2)$$

4.2.3 Resultados de las simulaciones

En este apartado se presentan las prestaciones del sistema para los 3 algoritmos descritos anteriormente y sus correspondientes variantes (RB/MCS y PriHoL/PriDin) en distintas condiciones de carga, que van desde 72 a 108 usuarios con conexiones activas por celda. El límite superior de las simulaciones ($N_{max}=108$ usuarios) se ha ajustado considerando de forma aproximada el número de usuarios admisibles en cada celda, bajo la suposición de que no hubiera restricciones de retardo, y por tanto a medio plazo se pueda conseguir el multiplexado estadístico de las fuentes de modo que todos los usuarios puedan recibir su tasa objetivo. Para ello se asume que se asignan todos los RBs del sistema utilizando la MCS definida como objetivo (MCS2) de acuerdo con el diseño del sistema, con lo que en cada RB se transmite una tasa $R_{MCS2}=240$ bits:

$$N_{max} = \frac{N_{RB} \cdot R_{MCS2}}{\alpha \cdot T_{obj,k}} = \frac{27RBs \cdot 240bits / RB}{0,25 \cdot 240bits / TTI} = 108 \text{ usuarios} \quad (4.3)$$

En un escenario con tráficos sin límites de retardo, el uso de MCSs más altas permitiría garantizar el requisito de tasa objetivo para un mayor número de usuarios. Sin embargo, en el caso de servicios con restricciones de retardo, el

retraso acumulado por los tráficos provoca el descarte de paquetes. En este escenario, que es el considerado en este apartado, se asume que la región de scheduling va a estar limitada por el número de usuarios para el que la probabilidad de descarte de TUs se sitúa en el 1%, dado que es el criterio de calidad fijado en el sistema. No obstante, la aplicación de una disciplina de gestión de recursos adecuada y la posibilidad de explorar el uso de MCSs más altas para recuperar retrasos, nos permitirá acercarnos al límite teórico N_{max} .

Análisis de la tasa de descarte de TUs

La Figura 4.12 muestra las curvas de la tasa de descarte de TUs promedio en la celda para cada uno de los algoritmos y con todas las opciones consideradas para la asignación de recursos adicionales: RBs adicionales o mejora de la MCS; y gestión de la prioridad de scheduling: prioridad por HoL (*PriHoL*) o prioridad dinámica (*PriDin*). Las simulaciones indican que, aunque las diferencias no son muy significativas (particularmente en el caso de *PriHoL*, las diferencias son apenas perceptibles), los mejores resultados se obtienen en todos los casos para el algoritmo que prioriza el uso de MCSs más eficientes (curvas en rojo) antes de asignar RBs adicionales (curvas en azul). La razón de esta mejora es que la priorización del uso de MCSs altas permite dejar RBs libres para la asignación de otras conexiones, lo que mejora la accesibilidad del sistema. La liberación de recursos repercute de forma especialmente relevante en los usuarios del exterior de la celda, puesto que por normal general requerirán el uso de una MCS menos eficiente que precisa más RBs para transmitir la tasa demandada por el usuario. Por tanto, con la opción de mejora de la MCS tienen más oportunidades de acceso. En cualquier caso, en condiciones de carga moderada o alta, para evitar que usuarios con malas condiciones de canal limiten la accesibilidad del resto de terminales debido a que requieren continuamente RBs con una MCS poco eficiente, una posible estrategia pasa por definir un bloqueo a los usuarios más ineficientes, de modo que se limita la asignación de recursos a dichos usuarios

siempre y cuando no se ponga en riesgo el cumplimiento de sus requisitos de QoS [Guío y otros, 2010].

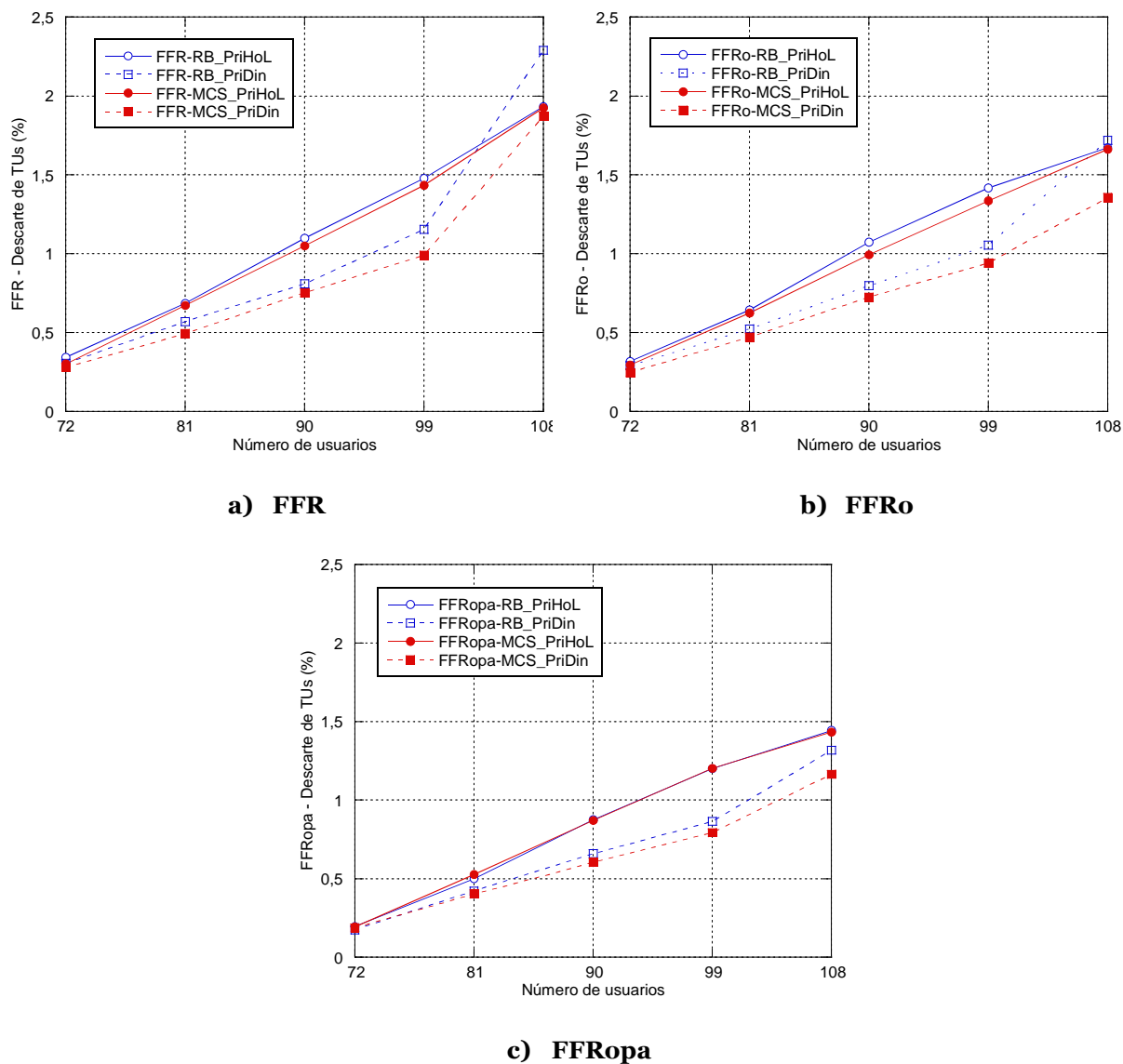
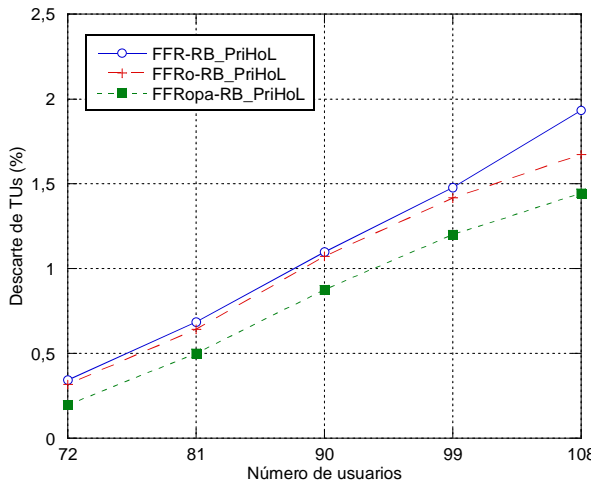


Figura 4.12: Descarte de TUs para las distintas opciones de los algoritmos

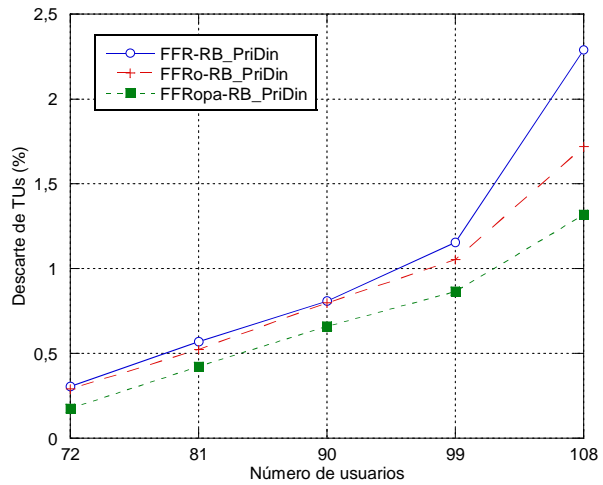
En lo que se refiere a la gestión de la prioridad de scheduling, las curvas anteriores indican que la opción PriDin ofrece las mejores prestaciones en todos los casos puesto que gestiona de forma más eficiente la QoS que la opción PriHoL. Esto se debe a que la prioridad dinámica proporciona más oportunidades de transmisión a aquellos usuarios que ven más retrasado el

cumplimiento de su QoS, de acuerdo con la estrategia de scheduling considerada. En el caso de PriHoL, puesto que las oportunidades de asignación se ofrecen secuencialmente de acuerdo con el orden de prioridad de scheduling calculada al inicio del TTI, los usuarios que acumulan retrasos en sus tráfico no reciben suficientes oportunidades de asignación como para recuperarse de ellos. De ahí que incluso al priorizar el uso de MCSs altas, no se aprecie diferencia en el porcentaje de descarte. Por tanto, la combinación que ofrece unas mejores prestaciones globales pasa por la mejora de la MCS para asignar recursos adicionales junto con el uso de prioridad dinámica para la gestión de las prioridades de scheduling.

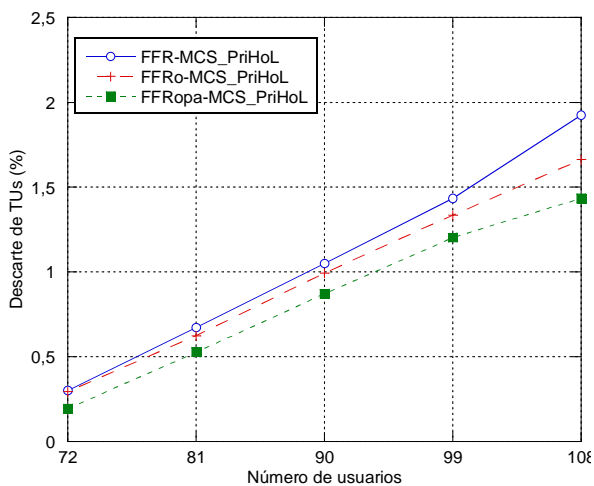
La Figura 4.13 muestra las mismas curvas pero separadas por algoritmo para poder así realizar una comparación más sencilla entre ellos. Los resultados indican que para todos los casos, la ordenación en la asignación de RBs permite reducir la tasa de descarte al controlar de forma más eficiente la interferencia. Sin embargo, dicha mejora se ve contrarrestada por una reducción en la libertad de asignación del scheduler, lo que hace que en conjunto, los resultados para FFR y FFRo sean similares. Solo cuando la ordenación se aplica junto con el mecanismo de asignación de potencia con máscaras de potencia, es posible apreciar una mejora considerable en el descarte de TUs. Al gestionar dinámicamente la potencia de acuerdo con las condiciones de canal observadas por los usuarios, el scheduler consigue asignar recursos a usuarios que anteriormente no podían recibirlos por tomarse una asignación de potencia constante. Este aumento de la flexibilidad de asignación repercute en una reducción considerable en la tasa de descarte de paquetes, especialmente para condiciones de alta carga, donde la accesibilidad a los recursos es menor.



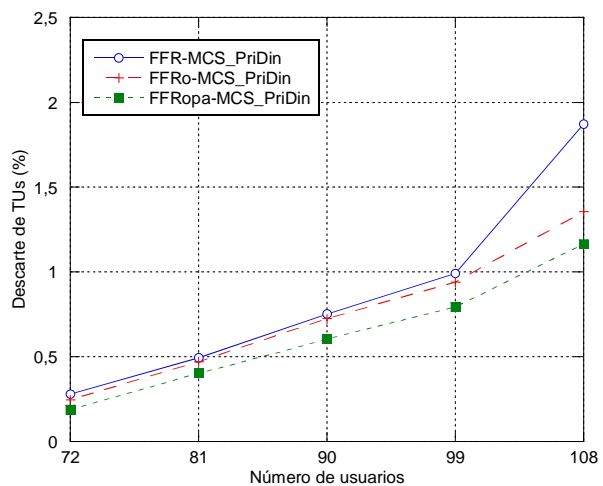
a) RB adicional, PriHoL



b) RB adicional, PriDin



c) Mejora de MCS, PriHoL

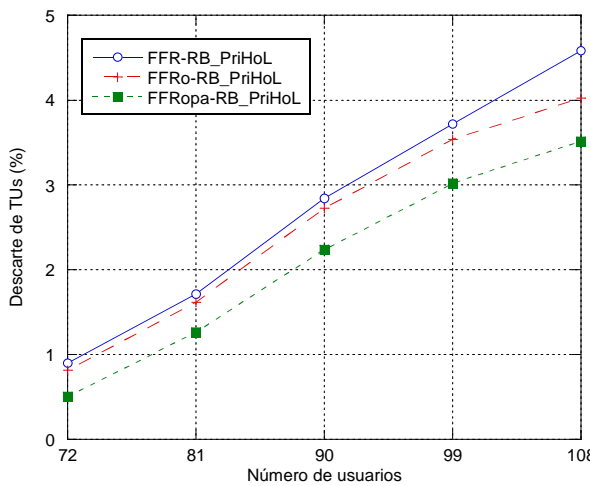


d) Mejora de MCS, PriDin

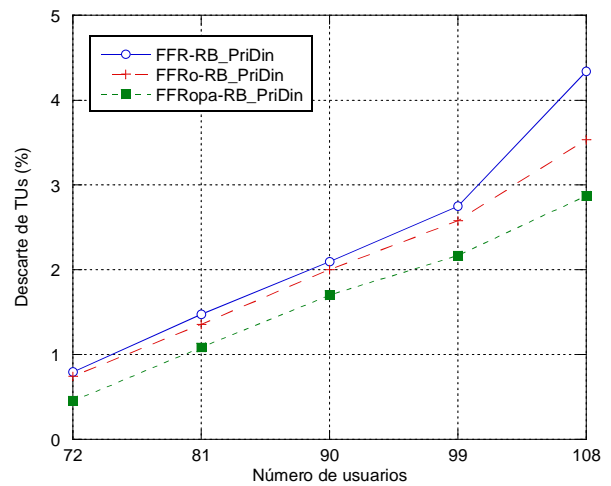
Figura 4.13: Descarte de TUs para los algoritmos considerados

Las curvas mostradas anteriormente recogen el descarte de TUs promedio en toda la celda. Sin embargo, el objetivo principal de los mecanismos de coordinación de interferencias es mejorar las prestaciones obtenidas por los usuarios del exterior de la celda, y especialmente en sistemas OFDMA con reuso unidad donde estos usuarios están especialmente expuestos al efecto negativo de la interferencia intercelular. Estas peores condiciones de interferencia, unidas a una mayor distancia a la BS, reducen las oportunidades de asignación

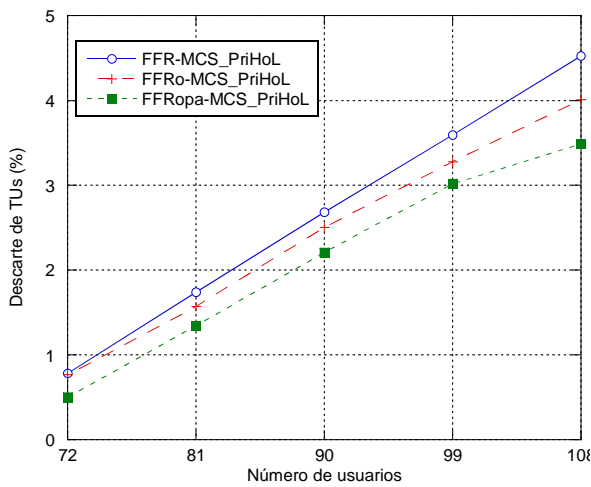
de los usuarios exteriores, lo que implica un mayor retraso en sus tráficos y un mayor descarte. La Figura 4.14 muestra la tasa de descarte de TUs considerando únicamente los usuarios localizados en el exterior de la celda (zona 2). La tendencia de estas curvas es similar a las del promedio global de la celda pero con unos valores más elevados como consecuencia de unas peores condiciones de canal. Es importante resaltar que el algoritmo FFRo y muy especialmente FFRopa, consiguen reducir la tasa de descarte también para la zona exterior, a pesar de que aplican el mismo esquema de asignación en la subbanda exterior



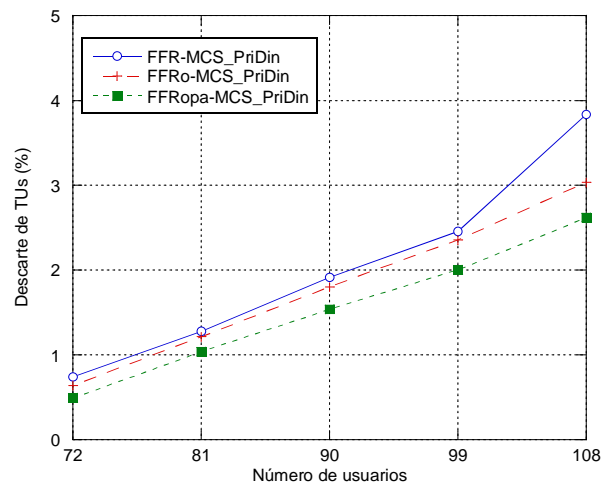
a) RB adicional, PriHoL



b) RB adicional, PriDin



c) Mejora de MCS, PriHoL



d) Mejora de MCS, PriDin

Figura 4.14: Descarte de TUs en la zona exterior

que FFR. Esto es debido a que la ordenación en la asignación y la gestión dinámica de potencia, permiten mejorar las condiciones observadas por los usuarios frente a FFR. Así, más usuarios podrán ser asignados en la subbanda interior, dejando los RBs de alta potencia para aquellos usuarios con muy malas condiciones de canal y que realmente los necesitan. El resultado es una reducción importante del descarte para todos los usuarios de la zona exterior, y por tanto, una mejora de la equitatividad dentro de la celda.

Al igual que sucede para el descarte global en la celda, las curvas de la zona exterior indican que los algoritmos basados en prioridad dinámica también logran reducir significativamente el descarte de TUs en la zona exterior frente a sus correspondientes versiones con prioridad por HoL. A modo de ejemplo, una tasa del 1% de descarte en los usuarios exteriores se obtiene con 73 usuarios en la celda en el caso de FFR-RB_PriHoL, mientras que ese valor aumenta hasta los 80 usuarios con FFRopa-RB_PriDin. Como ya se ha referido con anterioridad, los usuarios situados en el exterior de la celda tienen una menor accesibilidad al sistema como consecuencia de unas peores condiciones de canal, lo que supone que normalmente acumularán más retraso en sus buffers. Al aplicar un esquema de prioridad dinámico, se ofrecen más oportunidades de asignación a los usuarios del exterior para recuperarse de dichos retrasos, y de ahí que el descarte para estos usuarios exteriores se vea sensiblemente reducido. Este hecho puede comprobarse fácilmente en la Figura 4.15, donde se representa el porcentaje de RBs asignados a usuarios de cada zona para FFRopa (para FFR la tendencia es similar). A medida que la carga del sistema aumenta, los algoritmos PriDin asignan más RBs a los usuarios de la zona 2 que sus homólogos PriHoL. Por el contrario, los usuarios de la zona 0 reciben un menor número promedio de RBs, pero como sus condiciones de canal son mejores, pueden utilizar MCSs más eficientes para recuperarse de los retrasos sufridos.

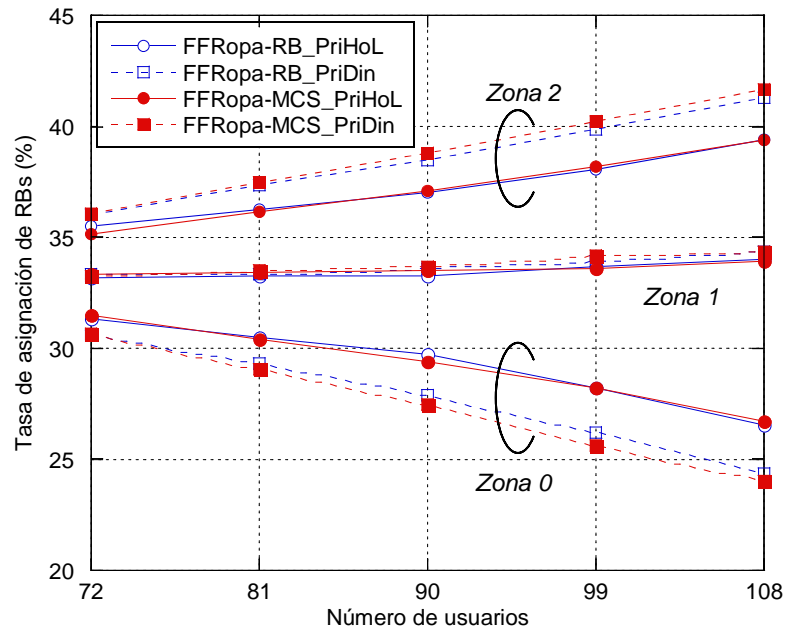


Figura 4.15: Tasa de RBs asignados en cada zona para FFRopa

Capacidad de la celda

La Tabla 4.3 muestra el valor real de capacidad de la celda en número de usuarios para cada uno de los algoritmos considerados, fijando como criterio límite que la tasa de descarte global en la celda sea del 1%. Cabe destacar que el uso del algoritmo FFRopa mejora en todos los casos la capacidad de la celda en más del 5% con respecto al esquema FFR. La prioridad dinámica consigue una ganancia por encima del 8% frente a la prioridad por HoL puesto que es capaz de seguir con mayor precisión el estado de los servicios. En conjunto, la ganancia del mejor algoritmo descrito (FFRopa-MCS_PriDin) sobre el primero y más simple de ellos (FFR-RB_PriHoL) es del 18%.

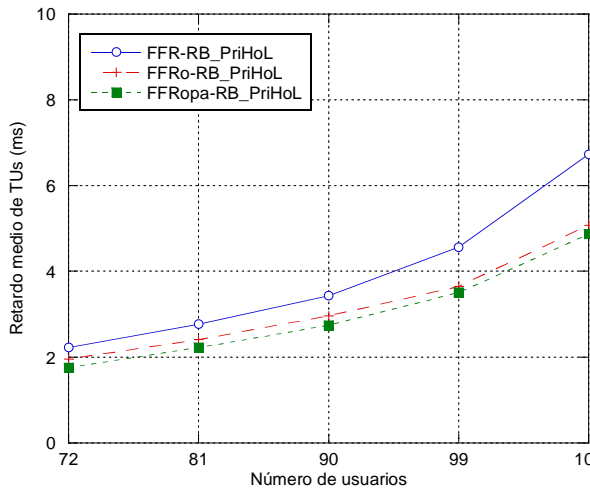
Tabla 4.3: Capacidad de la celda para cada algoritmo

Algoritmo	RB adicional, PriHoL	RB adicional, PriDin	Mejora MCS, PriHoL	Mejora MCS, PriDin
FFR	88	95	89	99
FFRo	88	97	90	100
FFRopa	93	101	93	104

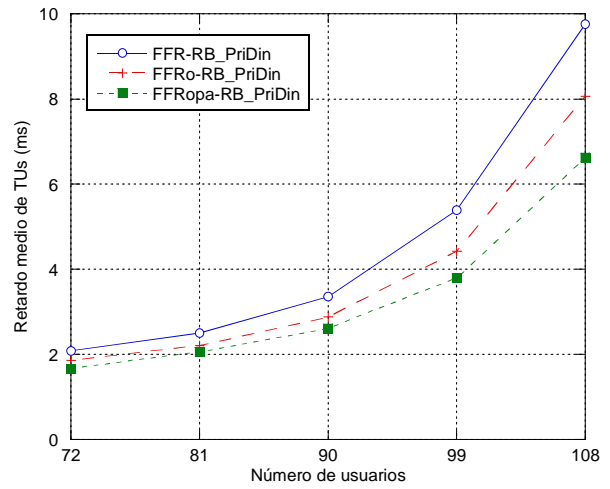
Estudio del retardo promedio de TUs

El retardo promedio de TUs da una idea adicional de la percepción que tiene el usuario del servicio recibido. A medida que la carga en la celda aumenta, el retardo experimentado por los paquetes crece como resultado de una menor accesibilidad al sistema. Sin embargo, es importante destacar que este retardo promedio solo se contabiliza para aquellos paquetes que son recibidos satisfactoriamente por el usuario, con lo que los paquetes descartados por exceder el retardo máximo no son contabilizados. Esto implica que por sí misma, la medida del retardo no sea una métrica directa de las prestaciones ofrecidas por los distintos algoritmos, sino que debe analizarse en conjunto con la tasa de descarte.

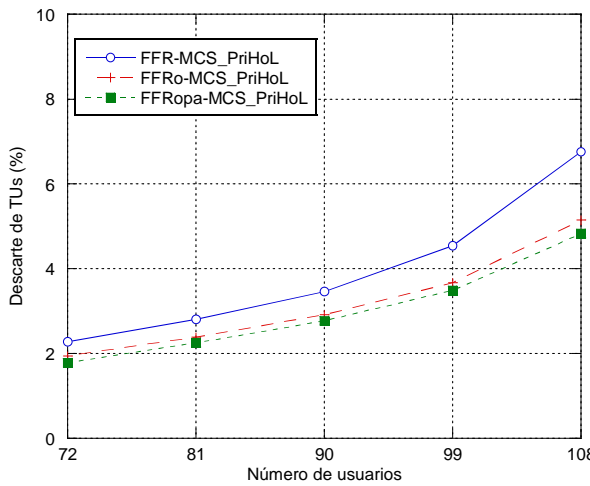
La Figura 4.16 muestra el retardo promedio de TUs para cada una de las opciones consideradas. Como era lógico esperar a tenor de los resultados anteriores, dentro de la misma disciplina (RB frente a MCS o PriHoL frente a PriDin) el retardo experimentado con FFR_{opa} es menor en comparación con FFR y FFR_o. Dado que las condiciones radio ofrecidas son mucho mejores, el esquema FFR_{opa} es capaz de gestionar eficientemente una mayor cantidad de datos, lo que vuelve a poner de manifiesto su idoneidad para su aplicación en redes OFDMA. Centrándonos en el caso de FFR_{opa}, se observa que todas las opciones presentadas proporcionan un retardo promedio similar, salvo cuando la carga de la celda es elevada. En este caso, los algoritmos basados en prioridad dinámica acarrear un retardo mayor que sus homólogos con prioridad por HoL. Sin embargo, lejos de suponer una desventaja, este hecho indica que los algoritmos PriDin realizan una gestión más eficaz de la prioridad de asignación: como los algoritmos con prioridad dinámica ofrecen más oportunidades de asignación a los usuarios con mayor retraso en sus flujos, el resto de usuarios aumentan ligeramente su retardo promedio, y de ahí que el retardo global crezca pero las prestaciones en términos de descarte sean mejores.



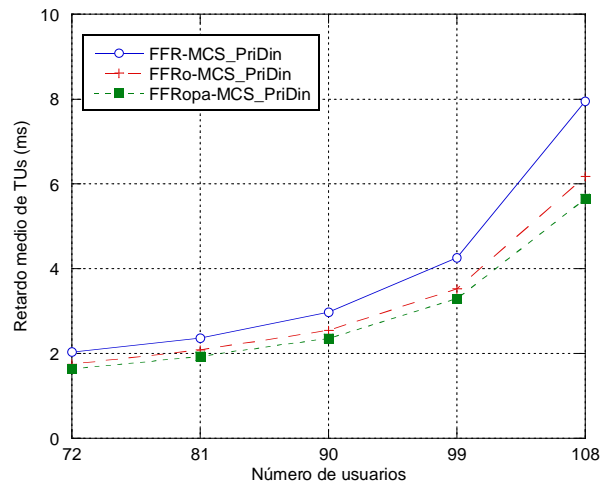
a) RB adicional, PriHoL



b) RB adicional, PriDin



c) Mejora de MCS, PriHoL



d) Mejora de MCS, PriDin

Figura 4.16: Retardo medio de TUs para los algoritmos considerados

Asignación de RBs y MCSs

A medida que la carga de la celda aumenta, aparece el efecto de la escasez de recursos, que acaba llevando a la congestión del enlace radio. La Figura 4.17 muestra el porcentaje de RBs no asignados para cada uno de los algoritmos. Como es lógico, el número de RBs no asignados es ligeramente superior en el caso de los algoritmos que priorizan la mejora de MCS puesto que los usuarios pueden utilizar MCSs más eficientes en vez de recibir RBs adicionales. Si

comparamos el uso de RBs en la priorización por HoL (Figura 4.17a) y en la priorización dinámica (Figura 4.17b), se comprueba que no hay mucha diferencia en cuanto al número promedio de RBs libres, pero la tasa de descarte es sensiblemente mejor con la priorización dinámica. Esto es debido a que cuando la carga de la celda en una determinada subtrama es baja, ambos mecanismos de priorización se comportan de forma similar y permiten el acceso a todas las conexiones. Por el contrario, cuando se produce un pico de carga porque hay una mayor cantidad de datos a transmitir debido a la multiplexación estadística, el mecanismo de priorización dinámica asigna más recursos a las conexiones que ven menos satisfecha su QoS. El resto de conexiones incrementan ligeramente el número de paquetes en cola, pero este retardo será recuperado en subtramas sucesivas. Esta diferencia de comportamiento en las subtramas cargadas es lo que determina en definitiva la reducción del descarte para los algoritmos con prioridad dinámica.

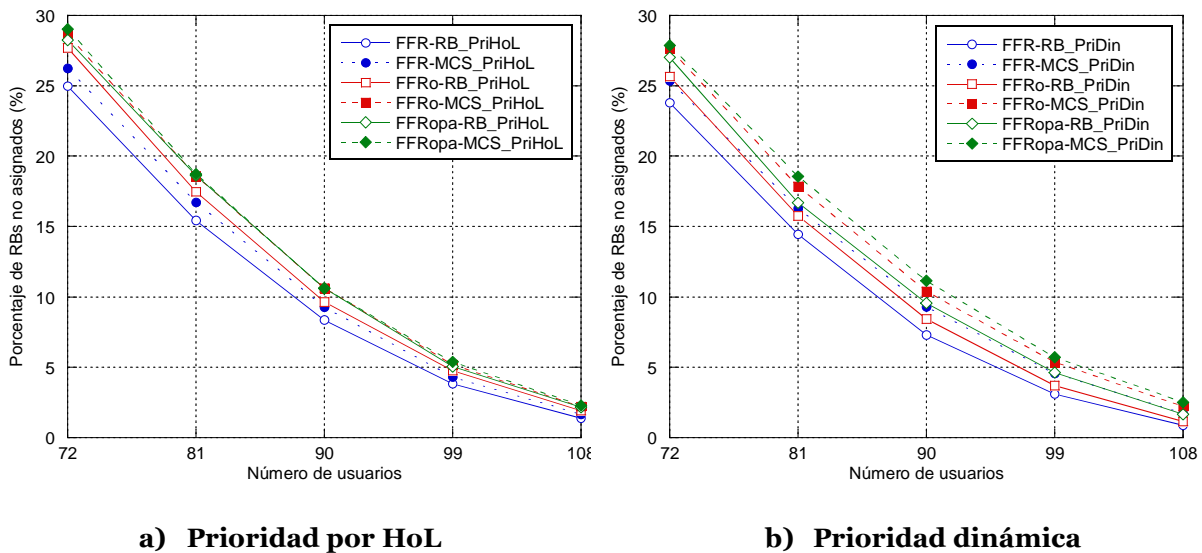


Figura 4.17: Porcentaje de RBs no asignados

La Figura 4.18 muestra la evolución del uso de las MCSs para los algoritmos FFR-MCS_PriDin (en línea continua) y FFRopa-MCS_PriDin (en línea discontinua). En primer lugar, cabe destacar que a medida que la carga de la

celda aumenta, las condiciones de interferencia empeoran y por tanto, más transmisiones se asignarán con la MCS0, lo que implica ocupar 2 RBs para transmitir la tasa generada por subtrama. Esto supone que comienzan a escasear los RBs y en más ocasiones será necesario utilizar MCSs altas (3 y 4) para recuperar los retrasos sufridos en los tráficos. Si comparamos ambos algoritmos podemos observar que en FFR-MCS_PriDin se hace un menor uso de la MCS2, mientras que se utilizan con mayor frecuencia el resto de MCSs. Este hecho se explica porque las condiciones de canal observadas por los usuarios en FFR son peores, con lo que aumentan las ocasiones en las que los usuarios tienen que trabajar con MCSs bajas (0 o 1) que ocupan más RBs, aumentando el retardo del resto de conexiones. Así, los usuarios en mejores condiciones de canal deberán utilizar MCSs más elevadas para recuperarse de los retrasos en los tráficos. Por el contrario, la gestión de la interferencia que realiza FFRopa-MCS_PriDin permite que los usuarios observen unas mejores condiciones de canal, con lo que se puede utilizar en mayor medida la MCS2, que es la que permite transmitir en 1 RB la tasa generada en cada TTI.

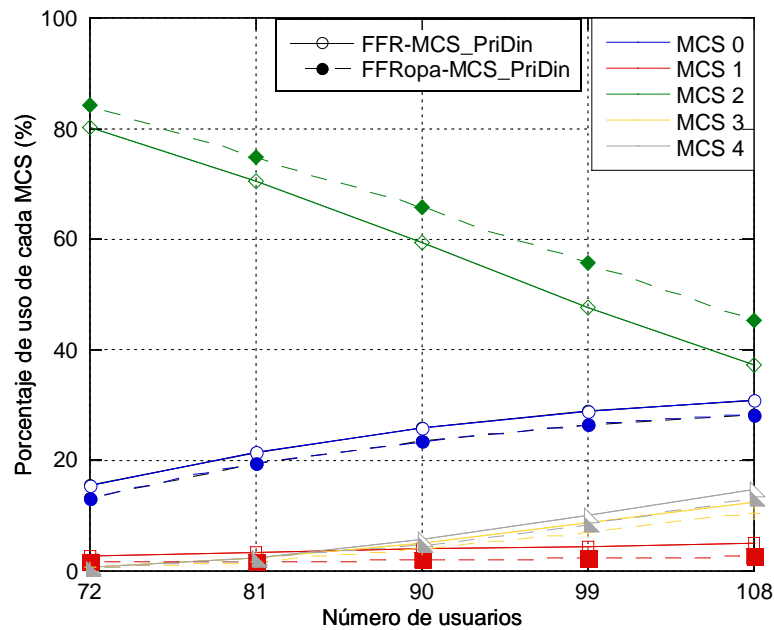


Figura 4.18: Porcentaje de asignación de cada MCS

Tasa de error en el bloque de datos

Otro elemento a tener en cuenta al evaluar las prestaciones de los algoritmos es la tasa de BLER que ofrece el algoritmo en la transmisión de datos: si bien los mecanismos de HARQ garantizan que los paquetes son correctamente entregados a las capas superiores, las sucesivas retransmisiones de paquetes aumentan el retardo del servicio y la carga real experimentada en la celda, y por consiguiente, el descarte de paquetes.

La Figura 4.19 muestra una comparación del BLER asociado a los esquemas FFR (en azul) y FFRopa (en rojo) para el global de la celda y detallado para cada una de las zonas. Se han simulado 2 puntos más con menor número de usuarios para poder apreciar también los efectos a baja carga. Como se puede apreciar en todos los casos, el BLER asociado al esquema FFRopa es sensiblemente más bajo que con FFR, gracias fundamentalmente a que la ordenación aplicada en la subbanda interior reduce la variabilidad de la interferencia y hace que la asignación de recursos sea más precisa. A medida que la carga de la celda aumenta, el BLER crece también debido unas condiciones de interferencia peores y a la necesidad de utilizar MCSs más altas para recuperar retrasos en sus tráficos. Sin embargo, en el caso de FFR se aprecia asimismo un aumento del BLER para condiciones de carga baja como resultado del efecto ON-OFF de la interferencia, tal y como se analizó en el apartado 4.1. Es especialmente destacable el BLER observado por los usuarios de la zona exterior (Figura 4.19d), que supera el 10% con los algoritmos basados en FFR frente al 2,5% observado por los usuarios exteriores con FFRopa.

Todos los resultados presentados en este apartado se han obtenido por medio de simulaciones asumiendo una velocidad de desplazamiento de 3km/h de los terminales, con lo que es posible obtener una estimación del estado del

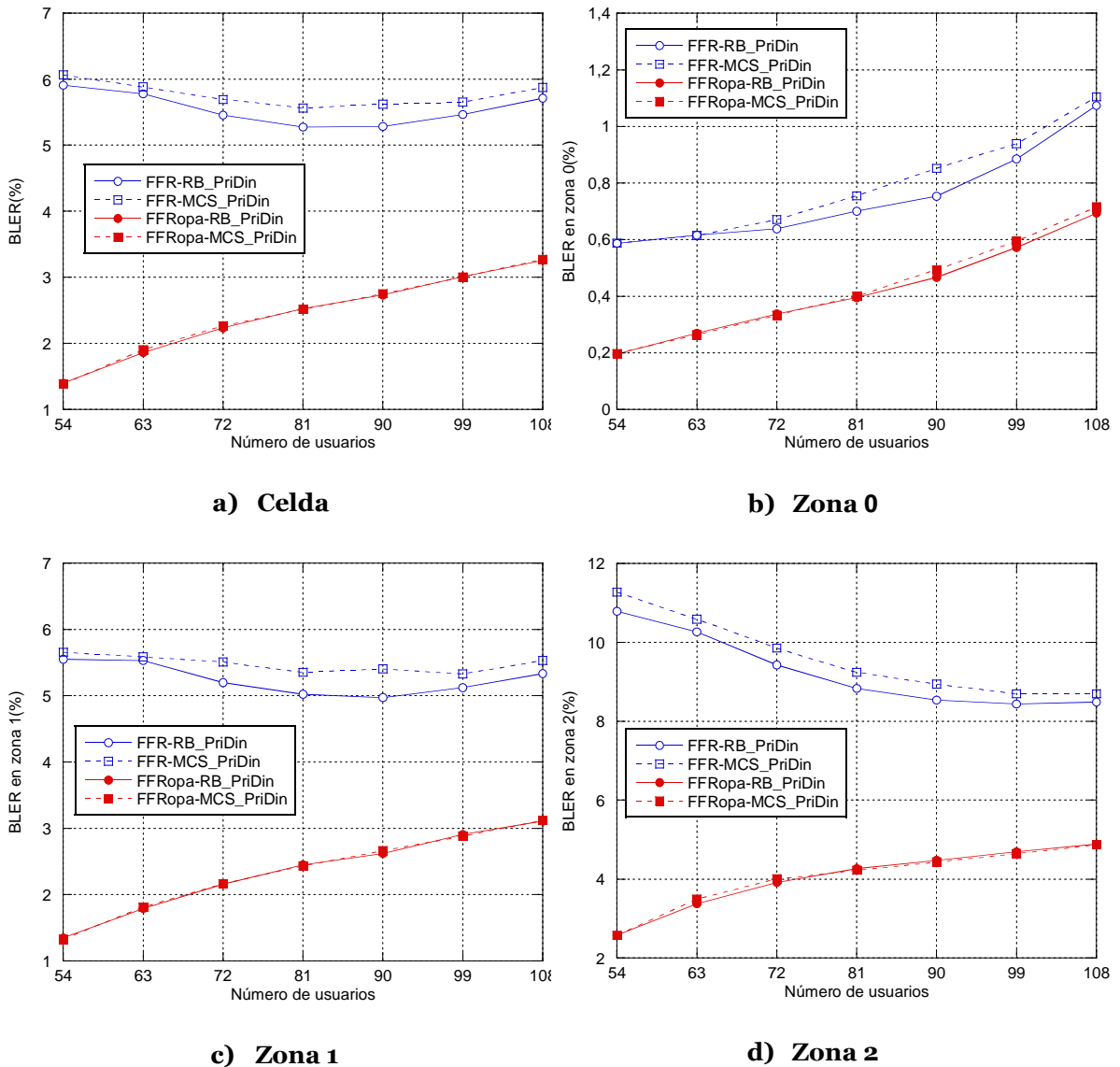


Figura 4.19: BLER en la celda y por zonas para FFR y FFRopa

canal con buena precisión. Como se vio en el capítulo anterior, a medida que la velocidad de desplazamiento crece se producen un mayor número de errores en la asignación de recursos que se traducen en un aumento del BLER de las transmisiones. Al tener que retransmitir más paquetes, la carga real del sistema crece y el 1% de descarte se alcanza para un menor número de usuarios en la celda.

Prestaciones en condiciones menos restrictivas de descarte

Finalmente, vamos a comparar brevemente la evolución del sistema cuando se permiten unas condiciones menos restrictivas en términos de descarte TUs. De acuerdo con las curvas recogidas en la Figura 4.20 sobre la tasa de descarte, las diferencias entre los algoritmos propuestos resultan más acusadas a medida que la carga del sistema aumenta, siendo aún más evidente la mejora obtenida

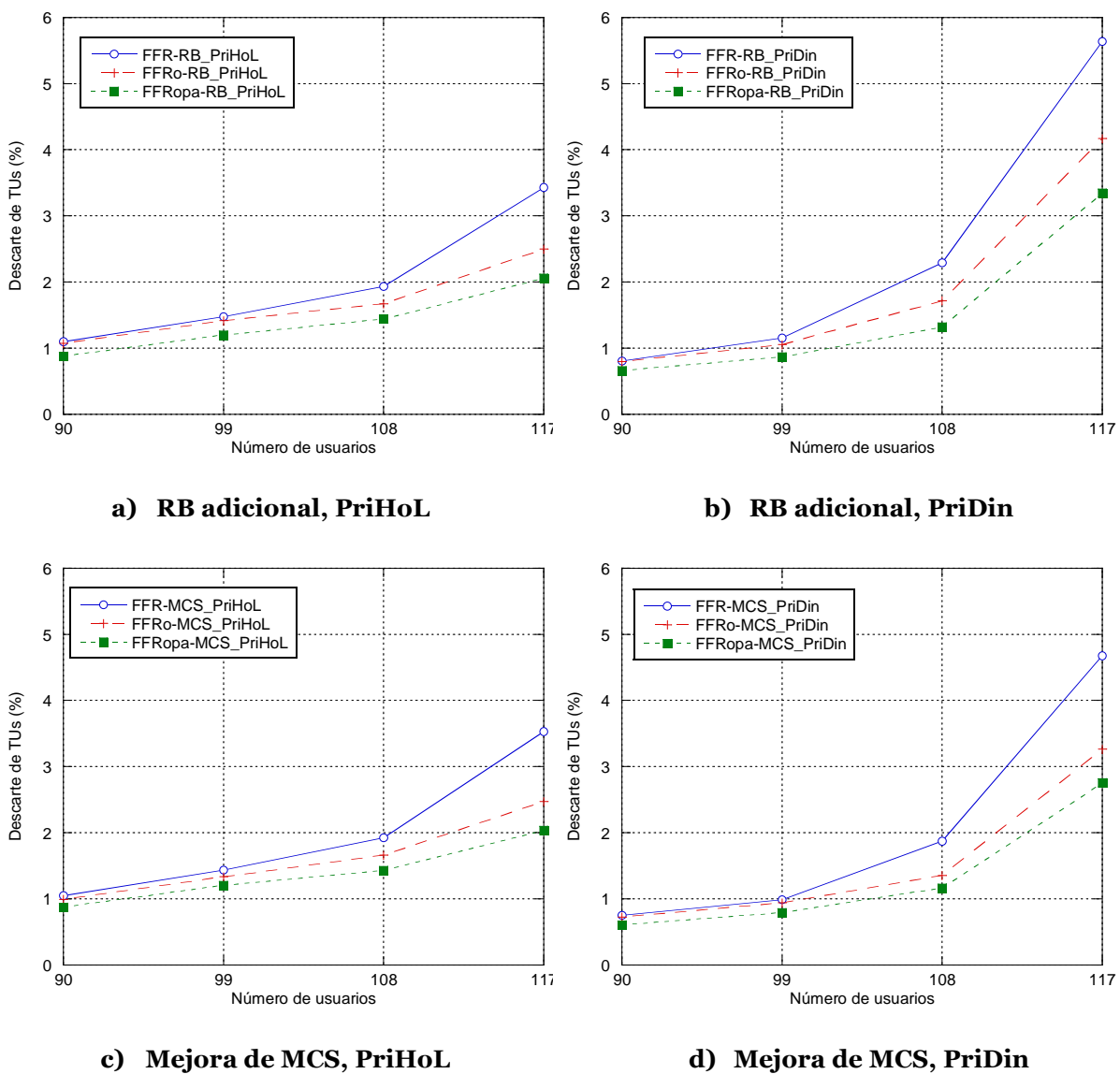


Figura 4.20: Tasa de descarte de TUs para una mayor carga del sistema

con el algoritmo FFR_{opa}. Los algoritmos basados en prioridad dinámica experimentan un crecimiento más rápido de la tasa de descarte que sus correspondientes versiones con prioridad por HoL. Esto se explica porque los usuarios del exterior acaban monopolizando los recursos radio y los usuarios del interior de la celda ven mermada considerablemente su accesibilidad, incrementándose también su tasa de descarte. Esto no sucede en HoL puesto que el reparto secuencial de oportunidades de asignación evita que determinados usuarios monopolicen los recursos de la celda. Para el caso de PriDin, el incremento del descarte es más acusado cuando el algoritmo prioriza la asignación de RBs antes de mejorar la MCS, ya que los RBs disponibles en la celda se consumen antes. Sin embargo, para el caso HoL no hay prácticamente diferencia como ya sucediera en las simulaciones anteriores.

4.2.4 Conclusiones

A lo largo de esta sección se han comparado una serie de algoritmos para la asignación de recursos radio en redes OFDMA con reuso unidad. Las conclusiones principales que pueden extraerse son las siguientes:

- *FFR vs. FFR_o vs. FFR_{opa}*: la ordenación en la asignación de RBs de la subbanda interior limita la variabilidad de la interferencia, lo que reduce a su vez el BLER, pero solo cuando se aplica junto con el mecanismo de asignación de potencia propuesto, se obtiene una reducción importante en el descarte de TUs y en el retardo.
- *Prioridad por HoL vs. prioridad individual*: el uso de prioridad individual ofrece una mejor gestión de los recursos al asignar más oportunidades de acceso a aquellas conexiones que ven menos satisfecha su QoS, de acuerdo con el mecanismo de scheduling temporal utilizado.
- *RB adicional vs. mejora de la MCS*: cuando se han de asignar recursos adicionales, la mejora de la MCS ofrece unas mejores prestaciones que la

asignación de RBs adicionales puesto que los usuarios en buenas condiciones de canal ocupan menos RBs, con lo que el número de usuarios que reciben asignaciones por subtrama es mayor.

A la vista de lo expuesto, el algoritmo que ofrece unas mejores prestaciones globales es FFR_{opa}-MCS_PriDin. Este será el algoritmo que utilizaremos en los siguientes análisis, bajo el nombre simplificado de *FFR_{opa}*, y lo compararemos con el algoritmo FFR-MCS_PriDin, denominado también por simplicidad *FFR*, como mejor algoritmo para el esquema de coordinación de interferencias FFR.

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

Las simulaciones mostradas en el apartado anterior permitieron realizar una comparativa entre un buen número de algoritmos de asignación de recursos para una determinada estrategia de scheduling temporal, que priorizaba aquellas conexiones con una tasa promedio cursada inferior a su tasa promedio requerida. En este apartado se va a profundizar en el análisis de la provisión de QoS, analizando las prestaciones ofrecidas por los mejores algoritmos de scheduling frecuencial para diferentes estrategias de scheduling temporal. Consideraremos en primer lugar un escenario con un único tipo de servicio, de forma similar al apartado anterior, para posteriormente analizar un escenario de dos servicios con diferentes requerimientos de retardo. El objetivo final es analizar las prestaciones ofrecidas por el algoritmo FFR_{opa} frente a FFR en escenarios de tráfico con requisitos de retardo aplicando distintas estrategias de scheduling temporal.

4.3.1 Estrategias de scheduling temporal

Tal y como se ha detallado en el apartado 2.3.2, en la bibliografía pueden encontrarse un gran número de propuestas para el scheduling temporal. Para el

análisis aquí presentado se han considerado las 6 estrategias que se detallan a continuación. Dichas estrategias se encuentran entre las soluciones más comunes que pueden encontrarse en la literatura y puesto que tratan la priorización de tráfico desde diferentes enfoques, nos permitirán analizar qué aspectos son más adecuados a la hora de priorizar los tráfico en escenarios con requisitos de retardo.

- *Tasa*: ratio entre la tasa promedio recibida por el usuario y su tasa requerida. Este es el criterio utilizado en las simulaciones anteriores.
- *Proportional Fair (PF)* [Jalali y otros, 2000 Holtzman, 2001]: cociente entre la tasa promedio alcanzable por el usuario k ($\bar{r}_k[n]$) en los RBs que le pueden ser asignados en el TTI n -ésimo frente a la tasa promedio recibida por el usuario $T_k[n]$ (calculada como en el criterio tasa). En esta estrategia, los usuarios que observan un mejor canal son aquellos que logran a la larga una mayor prioridad de asignación para sus servicios.

$$k^* = \arg \max_k \frac{\bar{r}_k[n]}{T_k[n]} \quad (4.4)$$

- *Earliest Deadline First (EDF)* [Chiussi y Sivaraman, 1998]: esta estrategia da más prioridad a la conexión a la que pertenece el paquete con menor tiempo restante hasta su cota máxima. Si denominamos $W_k[n]$ al retardo que acumula el paquete más retrasado de la conexión k en el TTI n -ésimo y $D_{max,k}$ la cota máxima del servicio de la conexión k , la prioridad se calcula como:

$$k^* = \arg \min_k (D_{max,k} - W_k[n]) \quad (4.5)$$

- *Modified Largest Delay First (M-LDF)*: la prioridad de asignación de cada conexión se determina en función del retardo acumulado por sus paquetes con respecto a su cota máxima de retardo. Al aplicar una ponderación del retardo de los paquetes, esta estrategia de scheduling permite tratar de forma equitativa conexiones con diferentes cotas máximas de retardo.

$$k^* = \arg \max_k \frac{W_k[n]}{D_{\max,k}} \quad (4.6)$$

- *Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF)* [Andrews y otros, 2001, Gowda y otros, 2007]: se trata de una versión de la estrategia PF ponderada por el retardo del paquete. El factor δ_k es un parámetro de diseño que marca la probabilidad deseada de que el retardo de los paquetes alcance un determinado valor D_k . Se han considerado los valores estándar para este parámetro: $\delta_k = 5\%$ y $D_k = 0,8 \cdot D_{\max,k}$.

$$k^* = \arg \max_k a_k W_k \frac{R_k[n]}{T_k[n]} \quad \text{con} \quad a_k = -\frac{\log(\delta_k)}{D_k} \quad (4.7)$$

- *Exponential Rule (EXP)* [Rhee y otros, 2004; Basukala y otros, 2009]: es una versión extendida del MLWDF en la que se añade un factor de ponderación exponencial que da más prioridad a las conexiones con un mayor retardo promedio que el resto.

$$k^* = \arg \max_k a_k W_k \frac{R_k[n]}{T_k[n]} \exp\left(\frac{a_k W_k[n] - \overline{aW}}{1 + \sqrt{\overline{aW}}}\right) \quad (4.8)$$

$$\text{con} \quad \overline{aW} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k W_k[n] \quad (4.9)$$

4.3.2 Escenario con un solo tipo de servicio

4.3.2.1 Condiciones de simulación

En este primer escenario de simulación, todos los usuarios utilizan el mismo tipo de servicio, modelado como en las simulaciones anteriores, por medio de un tráfico ON-OFF con una cota máxima de retardo de $D_{\max,k}=50\text{ms}$. Los parámetros de simulación son idénticos a los que se han utilizado en el apartado anterior. Al igual que en la sección 4.2, las prestaciones ofrecidas por los algoritmos de asignación y estrategias de scheduling temporal se analizan en

términos de tasa de descarte de TUs, limitando nuevamente la región de scheduling en una cota máxima de descarte del 1%.

4.3.2.2 Resultados de la simulación

La Figura 4.21 compara las prestaciones ofrecidas por las distintas estrategias de scheduling temporal para FFR (algoritmo FFR-MCS_PriDin) y FFRopa (algoritmo FFRopa-MCS_PriDin). Los resultados muestran que en todos los casos, las prestaciones de FFRopa mejoran las ofrecidas por FFR. Cuando la carga pasa de 99 a 108 usuarios por celda, el descarte con las estrategias Tasa, EDF y M-LDF aumenta rápidamente como resultado de la congestión que aparece en FFR. Sin embargo, para valores más bajos de carga se observa una mayor diferencia entre FFR y FFRopa para aquellas estrategias de scheduling temporal que tienen en cuenta el estado del canal a la hora de determinar la prioridad de las conexiones (PF, MLWDF y EXP). Esto se debe a que estas estrategias tienden a asignar con mayor frecuencia recursos a usuarios del interior de la celda, especialmente cuando las condiciones de canal de los usuarios del exterior son malas, lo cual sucede en mayor medida en FFR que en FFRopa. Este aspecto puede comprobarse en la Figura 4.22, donde se compara el porcentaje de RBs asignados a los usuarios de cada zona para M-LDF y EXP. A medida que la carga de la celda aumenta, la estrategia M-LDF asigna más RBs a los usuarios del exterior para compensar que acumulan mayor retraso por tener menos oportunidades de asignación. Sin embargo, la estrategia EXP tiende a ofrecer más oportunidades a los usuarios del interior de la celda porque disponen de mejores condiciones de canal. Este hecho puede verse claramente en el caso de FFR (Figura 4.22a), donde las malas condiciones de canal observadas por los usuarios del exterior de la celda hacen que reciban menos oportunidades de asignación con EXP, aumentando consecuentemente la tasa de descarte en la celda. En el caso de FFRopa (Figura 4.22b), como las

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

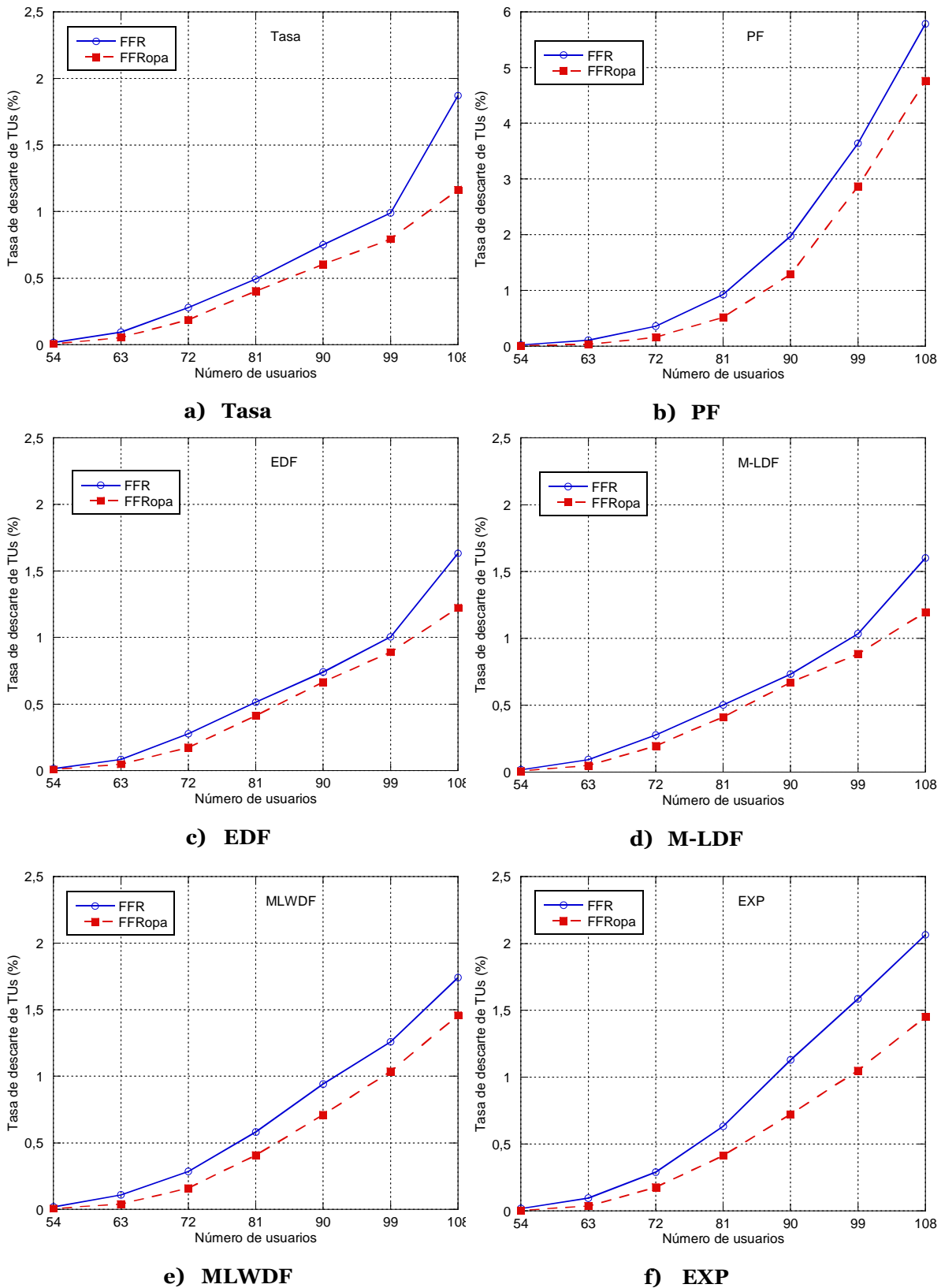


Figura 4.21: FFR vs. FFRopa para cada estrategia de scheduling temporal

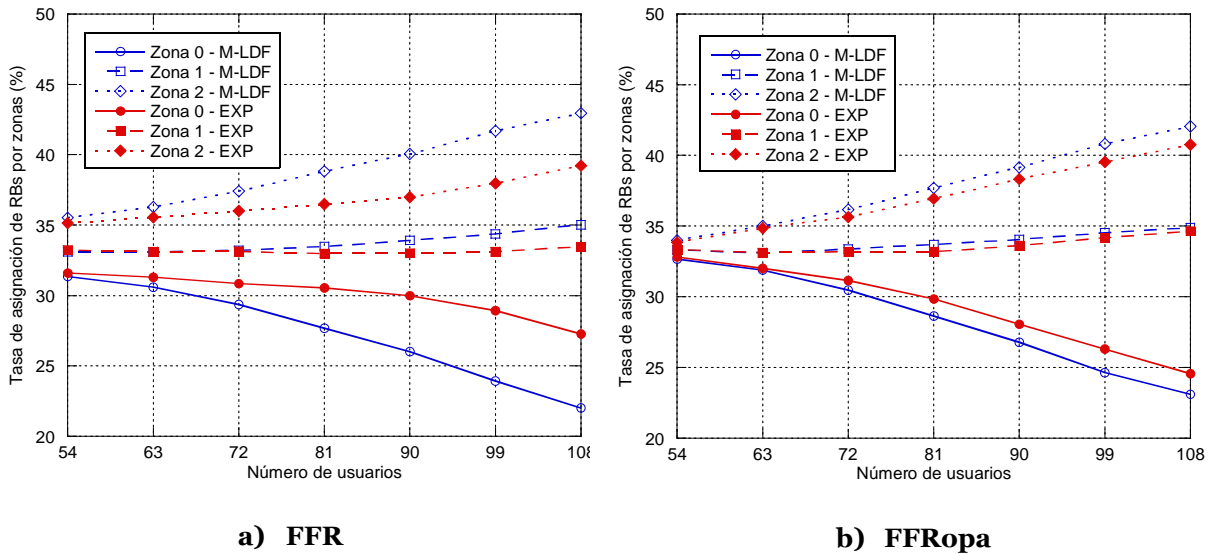


Figura 4.22: Asignación de RBs en cada zona para M-LDF y EXP

condiciones generales de canal son mejores, no existe una diferencia muy significativa entre ambas estrategias, con lo que las prestaciones en términos de descarte serán similares. Este razonamiento es extensible para las otras estrategias que consideran el estado del canal: MLWDF y especialmente PF, ya que en esta última, el canal es el único factor que se tiene en cuenta.

En la Figura 4.23 se muestra una comparativa de las estrategias de scheduling entre sí para FFR y FFRopa. Las simulaciones muestran claramente que el esquema PF no es capaz de garantizar de ningún modo el cumplimiento de los requisitos de QoS incluso para cargas muy bajas. Al priorizar las conexiones que pueden lograr una mayor tasa instantánea en cada TTI, los usuarios del interior de la celda monopolizan todos los recursos, incrementando considerablemente la tasa de descarte de los usuarios exteriores, y por tanto del global de la celda. Este efecto también puede apreciarse para los esquemas MLWDF y EXP, pero mucho más mitigado al considerar el retardo de las conexiones además del término del canal. El bloqueo a los usuarios exteriores es más acusado en el caso de FFR porque las condiciones de canal son peores, con lo que dichos usuarios no serán capaces de recuperarse suficientemente de los

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

retrasos en sus tráficos. Por otro lado, las estrategias Tasa, EDF y M-LDF ofrecen unas prestaciones similares, aunque se aprecia una peor tendencia en Tasa a medida que la carga de la celda crece (ver con más detalle en la Figura 4.24). Entre EDF y M-LDF no se aprecian apenas diferencias puesto que el cálculo de la prioridad de asignación con ambas estrategias proporciona una distribución de prioridad similar en este escenario de un único tipo de servicio.

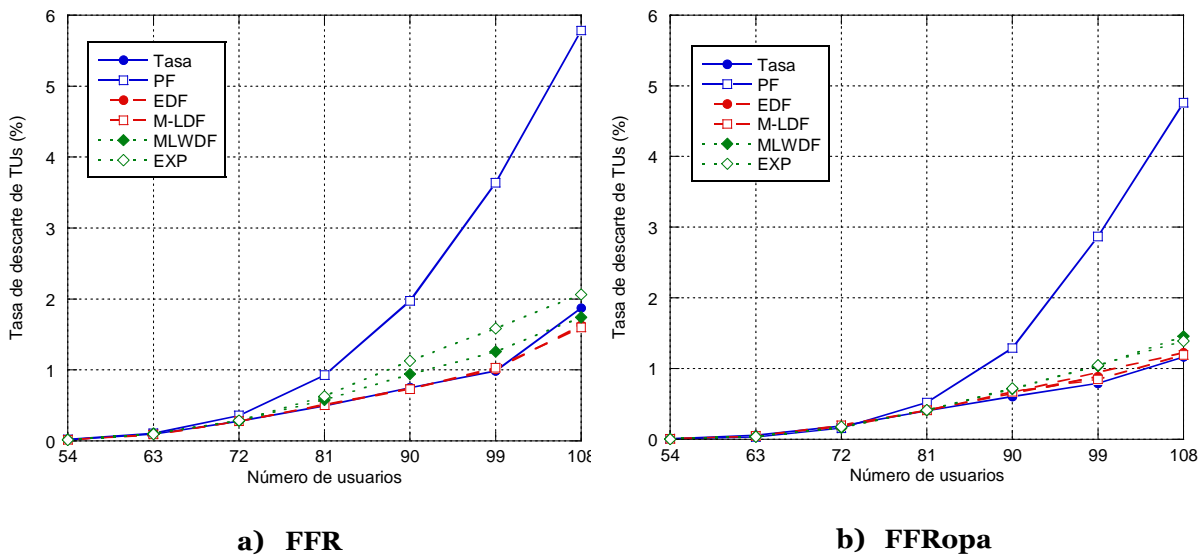


Figura 4.23: Comparación del descarte para las estrategias de scheduling temporal

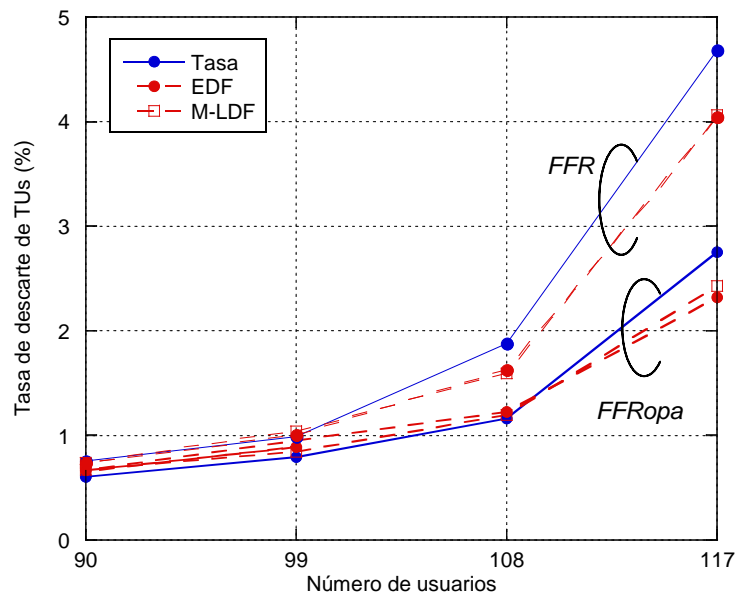


Figura 4.24: Comportamiento de Tasa, EDF y M-LDF con alta carga

Las prestaciones ofrecidas por las estrategias de scheduling pueden analizarse también desde el punto de vista de la gestión de los buffers que realizan. En la Figura 4.25 se representa para cada estrategia, el número medio de TUs que existen en los buffers de las conexiones al inicio del TTI con el algoritmo FFRopa. Dado que se generan 2 TUs en cada subtrama del periodo activo y el factor de actividad es $1/4$, el número medio de TUs en cola sería en condiciones ideales de 0,5 TUs. Dicho valor se obtiene en los usuarios de la zona 0 cuando la carga es media-baja (Figura 4.25a). La estrategia PF, y por extensión MLWDF y EXP, tienden a asignar más recursos a los usuarios del centro de la celda, que son los que observan mejores condiciones de canal, retrasando los servicios de los usuarios del exterior, con lo que estos almacenan un mayor número de TUs en sus buffers (Figura 4.25b). Por el contrario, las estrategias Tasa, EDF y M-LDF penalizan a los usuarios del interior de la celda para dar más oportunidades de asignación a los usuarios con mayor retraso en sus conexiones, de ahí que presenten un mayor número de TUs en las conexiones de la zona 0 y menor en las de la zona 2. De hecho, hasta que la celda entra en saturación, los valores del número de TUs en cola para la zona 0 y la zona 2 resultan similares. Este balanceo en la ocupación del buffer entre los

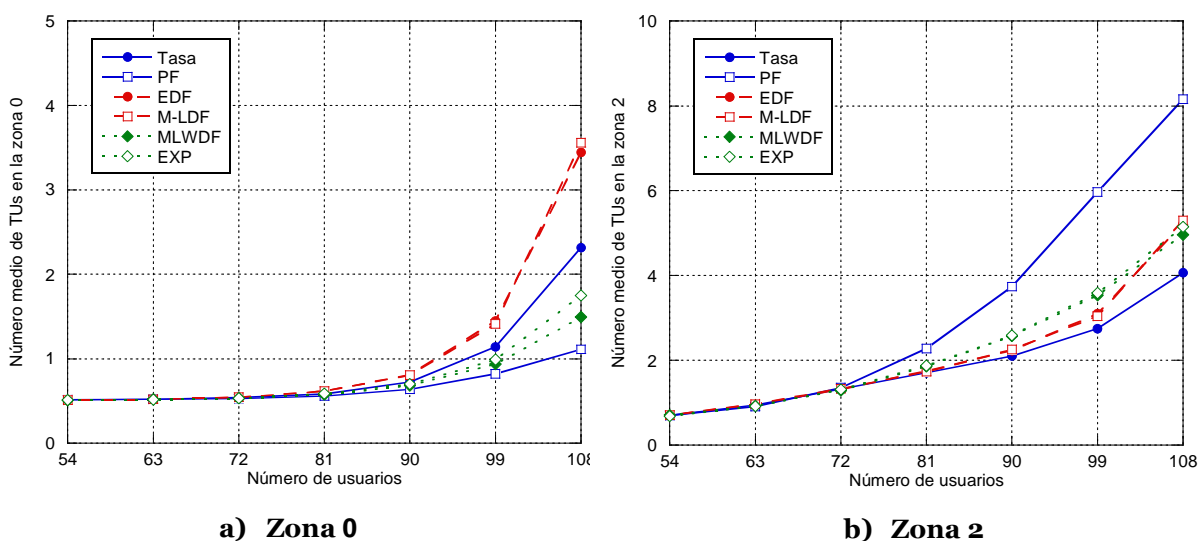


Figura 4.25: Número medio de TUs en cola para FFRopa

distintos usuarios resulta de especial importancia para lograr cierta equitatividad en la asignación de recursos a lo largo de la celda.

A continuación vamos a analizar el comportamiento de las estrategias de scheduling centrándonos en condiciones de baja carga, donde aparecía el efecto ON-OFF de la interferencia. La Figura 4.26 muestra con más detalle las prestaciones de las estrategias de scheduling temporal en estas condiciones de carga. Si bien en FFR se obtienen unas mejores prestaciones con Tasa, EDF y M-LDF, en FFRopa se observa una mejora clara cuando se utiliza PF o EXP, esto es, cuando se da mucho peso al estado del canal en el cálculo de la prioridad de scheduling. Las diferencias observadas entre FFR y FFRopa se deben fundamentalmente al efecto ON-OFF de la interferencia, que hace que no solo el scheduling frecuencial sino también el temporal, se vean impactados por el error en la estimación del canal. Las estrategias que no tienen en cuenta el estado del canal son las que mejor se comportan en el caso de FFR porque priorizan las conexiones por cumplimiento de QoS y evitan que el efecto ON-OFF impacte también sobre el scheduling temporal. Sin embargo, las condiciones de canal que ofrece FFRopa en baja carga son mucho mejores

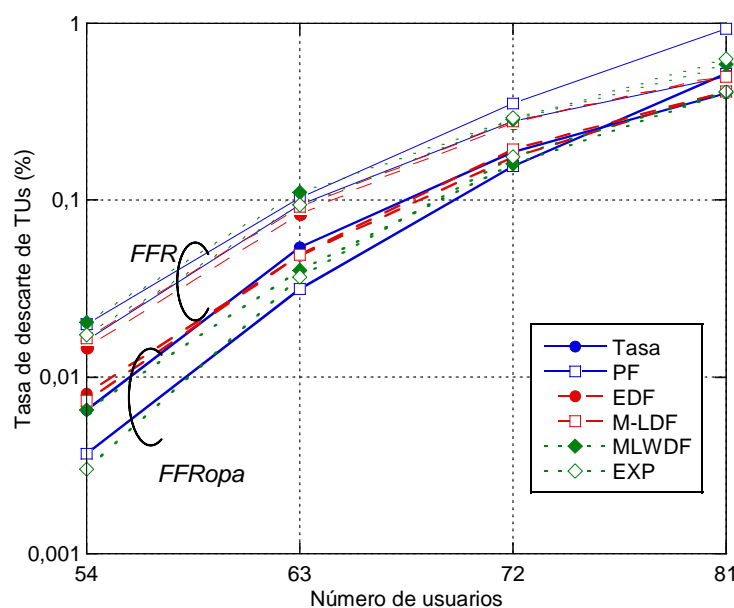


Figura 4.26: Comparación de las estrategias de scheduling temporal con baja carga

gracias a la ordenación en la asignación de RBs, lo permite que existan suficientes RBs disponibles para la asignación de los usuarios exteriores incluso cuando se aplican estrategias más dependientes del canal.

La Figura 4.27 ofrece una comparativa de las prestaciones en términos de retardo promedio de TUs para cada estrategia de scheduling temporal con FFR y FFRopa. Cuando la tasa de descarte es baja, los valores de retardo son similares para todas las estrategias, siendo la estrategia Tasa la que menor retardo consigue ya que intenta mantener una tasa de datos similar para todos los usuarios y el retardo acumulado por el servicio es menor. Por otro lado, la estrategia PF provoca normalmente un retardo acumulado mayor ya que no tiene en cuenta la QoS ofrecida, con lo que los usuarios en peores condiciones acumulan un mayor retraso en sus servicios debido a que disponen de menos oportunidades de recibir recursos. Las gráficas también muestran que a medida que aumenta la carga, el retardo promedio de las estrategias EDF y M-LDF se va despegando de Tasa y acaba estando por encima de PF. Esto es debido a que estas estrategias priorizan la asignación a los paquetes con un mayor retardo acumulado, por lo que la estadística refleja un mayor retardo promedio aunque el descarte de TUs sea de los más bajos obtenidos.

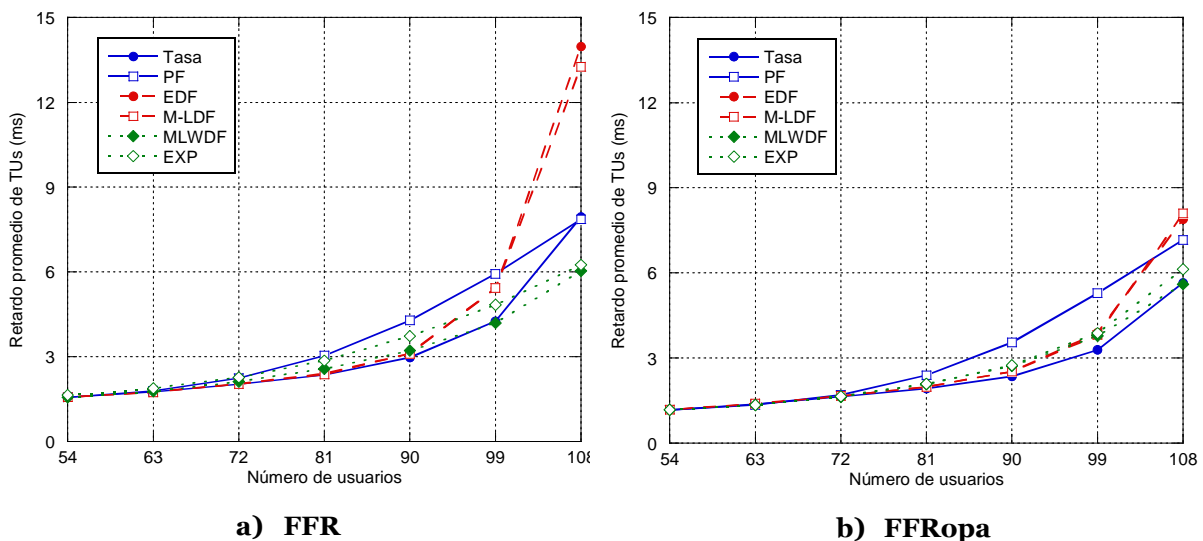


Figura 4.27: Comparación del retardo para las estrategias de scheduling temporal

Por último, la Tabla 4.4 muestra una comparación entre FFR y FFRopa para dos valores concretos de tasa de descarte de TUs en cuanto a capacidad de la celda (valores de la izquierda en cada casilla) y retardo promedio (a la derecha). Se observan similares resultados comparativos en términos de capacidad para ambos valores de tasa de descarte, siendo Tasa, EDF y M-LDF las estrategias que mejores prestaciones ofrecen. Para un valor de descarte del 1%, las estrategias que menos retardo acumulan son PF, MLWDF y EXP tanto en FFR como en FFRopa. Esto es debido a que estas estrategias dan más oportunidades de asignación a los usuarios con buenas condiciones de canal, que transmiten sus paquetes habiendo acumulado poco retardo, pero sin embargo hacen también que los usuarios del exterior de la celda acumulen más rápidamente paquetes y el 1% de descarte se alcanza con un menor número de usuarios.

Tabla 4.4: Comparativa de FFR y FFRopa (Capacidad / Retardo promedio)

	<i>Descarte de TUs 0,5%</i>		<i>Descarte de TUs 1%</i>	
	<i>FFR</i>	<i>FFRopa</i>	<i>FFR</i>	<i>FFRopa</i>
Tasa	81 / 2,3	85 / 2,1	99 / 4,1	104 / 4,6
PF	74 / 2,4	80 / 2,3	81 / 3,2	86 / 3
EDF	80 / 2,3	84 / 2,4	99 / 5,4	102 / 5,3
M-LDF	81 / 2,3	84 / 2,4	98 / 5,1	103 / 5,6
MLWDF	78 / 2,4	83 / 2,2	91 / 3,4	98 / 3,6
EXP	77 / 2,6	83 / 2,2	88 / 3,5	98 / 3,7

4.3.3 Escenario con dos tipos de servicio

En este apartado se van a analizar las seis estrategias de scheduling consideradas anteriormente pero en un escenario de simulación con dos tipos de servicios. Este caso se asemeja más a un escenario real, en el que los usuarios exigen distintos tipos de servicios, como conversacional, vídeo en tiempo real, navegación por Internet... De este modo podremos comprobar la capacidad de

cada estrategia de scheduling temporal para gestionar adecuadamente la prioridad de asignación para servicios con diferentes restricciones de QoS.

4.3.3.1 Condiciones de simulación

En este escenario se van a considerar dos tipos de servicios con diferentes cotas de retardo: $D_{max,k}=50ms$ (servicio 0) y $D_{max,k}=250ms$ (servicio 1). La región de scheduling vendrá en este caso marcada por el servicio más restrictivo en retardo, puesto que es el que más fácilmente alcanzará la tasa límite de descarte del 1%. El algoritmo de scheduling temporal deberá por tanto asignar recursos más frecuentemente a los servicios con una cota de retardo menor, puesto que será el servicio limitante en términos de descarte. Consideraremos una distribución homogénea de servicios a lo largo de la celda, es decir, en cada zona, el 50% de los usuarios utilizan el servicio 0 mientras que el 50% restante hacen uso del servicio 1.

4.3.3.2 Resultados de la simulación

La Figura 4.28 muestra una comparativa de las prestaciones obtenidas con FFR y FFRopa para las distintas estrategias de scheduling consideradas, mientras que la Tabla 4.4 recoge las prestaciones en términos de capacidad de la celda (tasa de descarte del 1% para el servicio 0). Como en el caso anterior, el algoritmo FFRopa mejora las prestaciones de FFR para cualquiera de las estrategias de scheduling. De entre estas, es M-LDF la que obtiene unas mejores prestaciones, reduciendo el descarte de TUs para el servicio 0, que es el tráfico más restrictivo (Figura 4.28a y b), y aumentando por tanto la capacidad de la celda. La estrategia EDF, que ofrecía las mismas prestaciones que M-LDF en el escenario de un único servicio, ve degradado claramente su comportamiento cuando se consideran 2 servicios. Esto es debido a que con EDF, los paquetes con una cota de retardo menor siempre tienen una mayor prioridad de

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

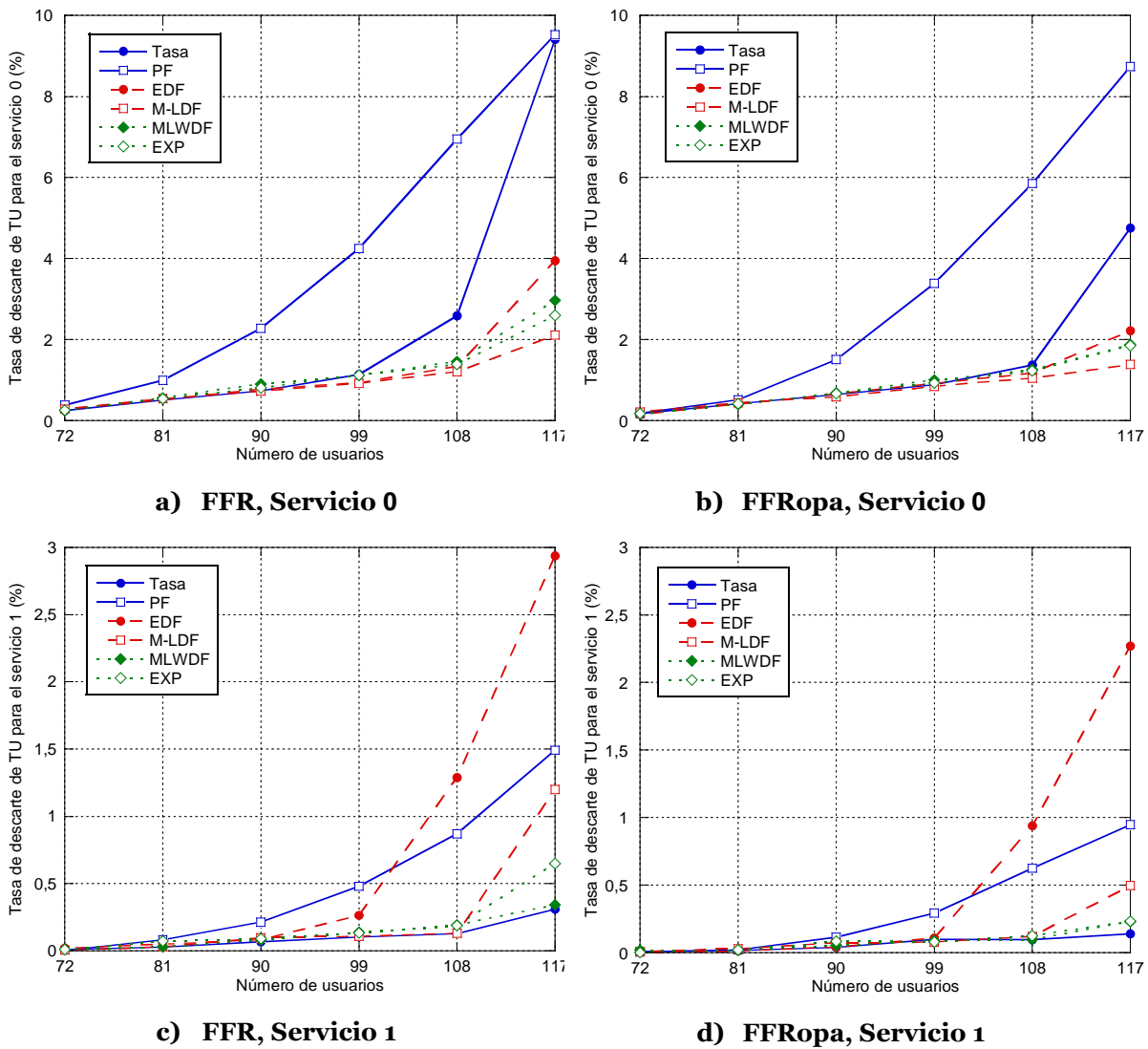


Figura 4.28: Tasa de descarte para ambos servicios con FFR y FFRopa

Tabla 4.5: Capacidad con FFR y FFRopa para dos servicios

	<i>FFR</i>	<i>FFRopa</i>
Tasa	96	101
PF	81	85
EDF	99	102
M-LDF	101	106
MLWDF	93	99
EXP	96	101

asignación. Por tanto, las conexiones con servicio 1 acumulan un gran número de paquetes en sus buffers hasta que la diferencia entre la cota y el retardo del paquete es inferior a 50ms, momento en el que la prioridad de ambos servicios se iguala. Entonces, el número de paquetes en los buffers del servicio 1 es tan elevado que resulta imposible recuperarse de este retraso, aumentando así su descarte (Figura 4.28c y d). Sin embargo, en el caso de M-LDF, la prioridad se calcula de forma proporcional a la cota máxima de retardo, de modo que todos los paquetes que alcanzan el 50% de su cota, obtienen la misma prioridad de asignación, independientemente del valor de dicha cota. Esto permite un reparto más equitativo de las oportunidades de asignación.

De acuerdo con los resultados anteriores y al igual que en el escenario de un único servicio, la estrategia PF ofrece un descarte muy elevado para el servicio 0 al limitar enormemente el acceso de los usuarios del exterior de la celda, lo que se traduce en un valor de capacidad muy bajo. Aunque las estrategias MLWDF y EXP consideran el retardo de los paquetes a la hora de establecer la prioridad, el peso del término PF es tan significativo que sus prestaciones son peores que las ofrecidas por las estrategias M-LDF. Por su parte, la estrategia Tasa, que en el escenario de un único servicio ofrecía buenas prestaciones, muestra ahora un peor comportamiento puesto que no prioriza las conexiones por retardo sino por tasa satisfecha. Esto supone que todas las conexiones son priorizadas de forma similar, independientemente de su cota de retardo o condiciones de canal. Por tanto, los usuarios con servicio 1 obtienen un descarte muy reducido mientras que los usuarios con servicio 0 ven más difícil satisfacer sus requisitos de QoS.

En la Figura 4.29 se muestra el número medio de TUs en cola para cada servicio y zona con el algoritmo FFRopa. Para ambos servicios, el número de TUs con el esquema PF crece a medida que nos alejamos del centro de la celda

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

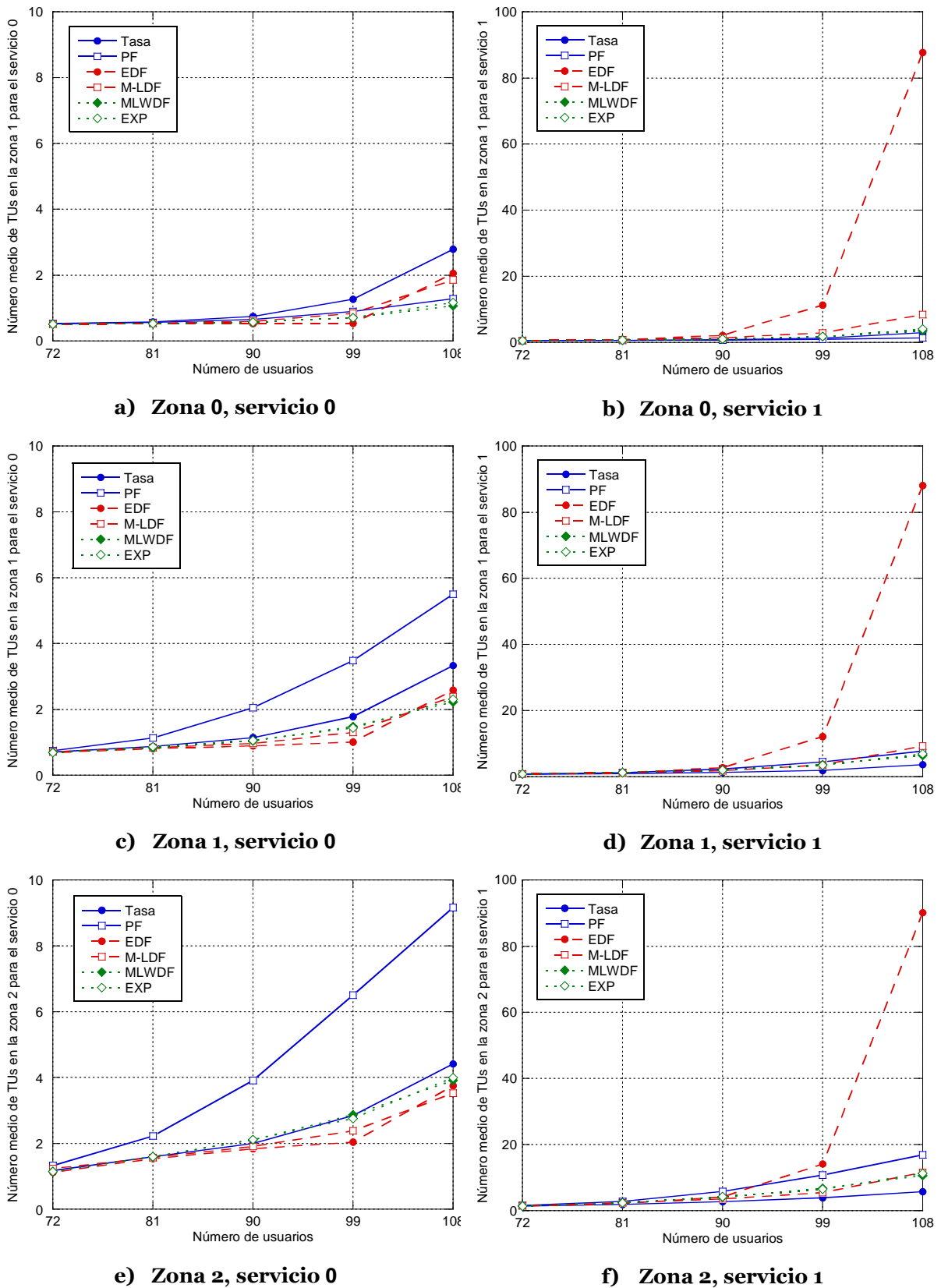


Figura 4.29: Número medio de TUs para cada servicio y zona con FFRopa

porque se ofrecen un menor número de oportunidades de asignación. En el servicio 0 se aprecia que con las estrategias MLWDF y EXP se acumulan un menor número de TUs en las colas de los usuarios del centro de la celda, pero aumenta en la zona 2 como efecto del término dependiente del canal que aplican. Sin embargo, las estrategias Tasa, EDF y M-LDF consiguen unos valores similares en las tres zonas porque se centran únicamente en el servicio prestado al usuario. La estrategia Tasa acumula mayor número de paquetes porque no prioriza el servicio 0 frente al servicio 1, mientras que EDF y M-LDF sí dan más prioridad a los usuarios con servicio 0 y de ahí que el número medio de TUs en cola sea menor. Resulta destacable el elevado número de TUs que almacenan en sus buffers las conexiones con servicio 1 para el caso de EDF, debido a las pocas opciones de asignación que se proporcionan a este servicio. Como se ha comentado, las conexiones correspondientes al servicio 1 acumulan tantos paquetes que no es posible recuperarse de estos retrasos y aumenta su tasa de descarte. Sin embargo, la estrategia M-LDF consigue balancear de una forma más eficiente las oportunidades de asignación entre los usuarios de diferentes servicios y condiciones de canal, lo que permite reducir el descarte global en la celda.

El número de paquetes en cola mostrado en las gráficas anteriores guardan relación con el retardo promedio experimentado en la transmisión de TUs (Figura 4.30). Se puede apreciar claramente que las estrategias PF y Tasa son las que mayor retardo acumulan para el servicio 0. Sin embargo, en condiciones de elevada carga, se aprecia un crecimiento significativo del retardo para las estrategias EDF y M-LDF, como resultado de su intento por balancear las oportunidades de asignación en función del retardo que acumulan los paquetes. A pesar de esto, el descarte obtenido con M-LDF es el menor de todos, lo que prueba la potencialidad de esta estrategia para la priorización de servicios dependientes del retardo. En la Figura 4.30c y d se puede observar claramente

4.3 Impacto del scheduling temporal en la provisión de QoS

el elevado retardo acumulado por los paquetes del servicio 1 en EDF, debido a su menor prioridad frente al servicio 0.

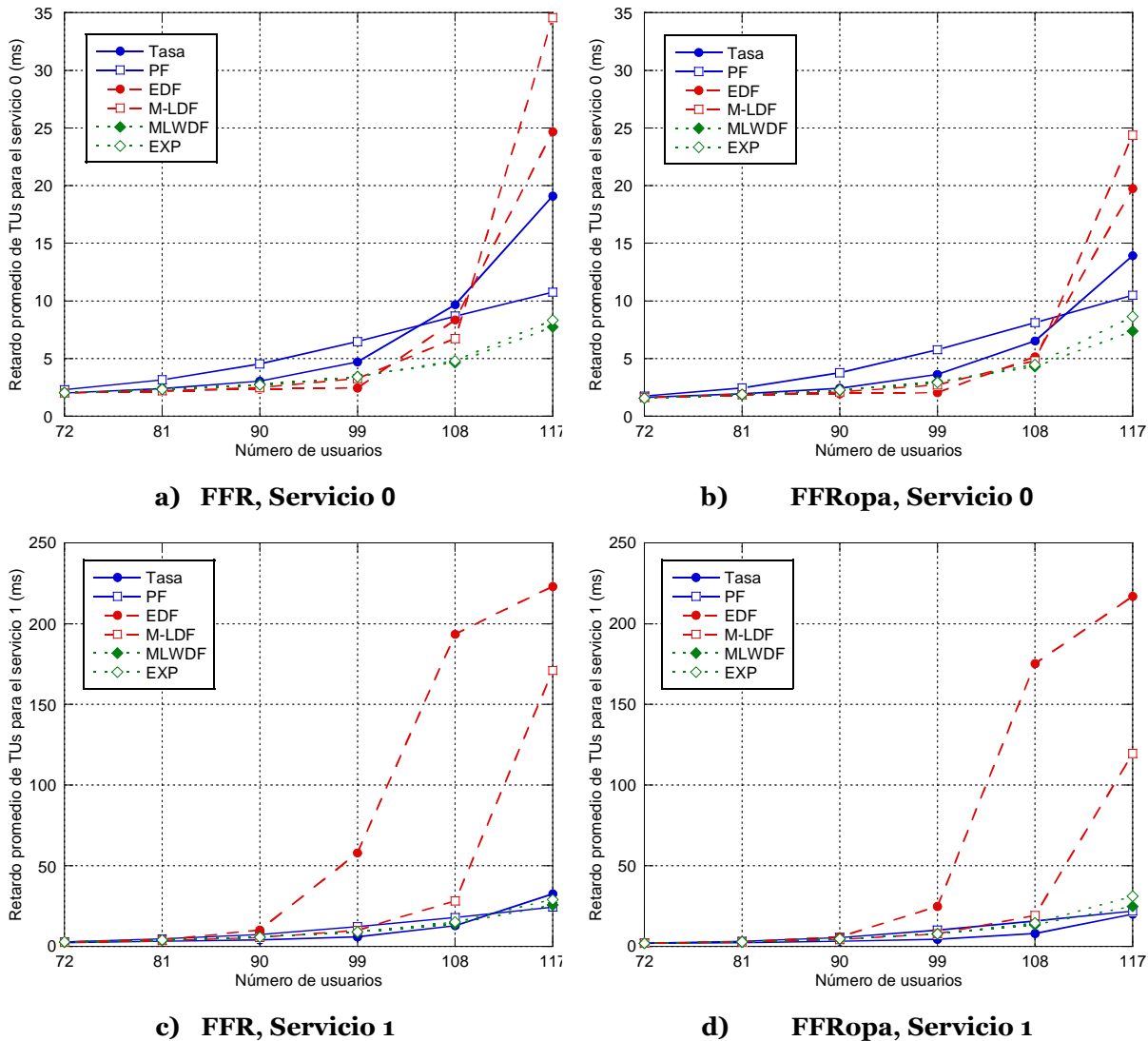


Figura 4.30: Retardo promedio de TUs para ambos servicios con FFR y FFRopa

El escenario con dos servicios aquí considerado puede extenderse de forma directa a un escenario en el que se mezcle un servicio en tiempo real con un servicio en tiempo no real, sin más que considerar que el retardo máximo asumido por este segundo servicio es $D_{max,k}=\infty$. En este caso extremo, el número de paquetes en el sistema aumentará enormemente y las diferencias entre los algoritmos se acentuarán. Solo la estrategia M-LDF será capaz de garantizar

convenientemente que el servicio en tiempo real cumple con los requisitos de QoS esperados, asignando siempre el máximo número de recursos posible a los usuarios de dicho servicio. El resto de los recursos del sistema se repartirían entre los servicios en tiempo no real, aunque para su priorización sería más conveniente utilizar otro tipo de estrategia debido a que no existen requisitos de retardo. Por ejemplo, se podría aplicar el criterio Tasa para ofrecer un reparto equitativo de los recursos o el esquema PF para maximizar la utilización de los recursos radio. Por tanto, cabe plantearse como posible mejora de la solución mostrada anteriormente un esquema de priorización por niveles compuesto a su vez por diferentes estrategias de scheduling temporal, cada una de las cuales se aplica sobre un tipo de servicio distinto. Si sobre los servicios de tiempo no real se definieran ciertos requisitos de tasa mínima garantizada a los usuarios, el cumplimiento de dichos requisitos debería considerarse de forma conjunta con la satisfacción de los requisitos de retardo de los usuarios en tiempo real. En este caso, sería más conveniente calcular de forma simultánea y mediante una única fórmula la prioridad relativa de ambos tipos de tráfico para que el scheduling sea más simple. Hay que prestar atención en este caso al peso relativo que se da a cada uno de los términos que componen la fórmula para que reflejen la prioridad real de cada servicio de acuerdo con el cumplimiento de los diferentes requisitos de QoS. A modo de ejemplo de este aspecto, las estrategias MLWDF y EXP ven degradadas sus prestaciones por culpa de que el término PF tiene un peso excesivo con respecto al término dependiente del retardo.

4.4 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han presentado diferentes propuestas para la asignación de recursos radio para la gestión de la interferencia y provisión de QoS a los usuarios en redes móviles OFDMA con reuso frecuencial unidad. De las simulaciones presentadas a lo largo del capítulo se puede extraer que entre

las propuestas analizadas para la asignación de recursos bajo un esquema FFR, es el algoritmo FFRopa el que ofrece una mejor gestión de la interferencia intercelular por medio de la aplicación de una ordenación en la asignación de RBs y de la reducción de la variabilidad de la potencia transmitida mediante el uso de máscaras de potencia. De entre las distintas variantes presentadas, la que mejores prestaciones globales ofrece es FFRopa-MCS_PriDin ya que intenta reducir el número de RBs ocupados, mejorando si es posible la MCS antes de asignar RBs adicionales, mientras que se realiza una gestión dinámica de la prioridad de las conexiones, de modo que se recalcula la prioridad de asignación de las conexiones tras la asignación de cada RB, con lo que se logra un seguimiento más preciso de la QoS ofrecida a los usuarios.

En cuanto a las estrategias de scheduling temporal, las simulaciones aquí presentadas indican que para servicios dependientes del retardo, la estrategia M-LDF es la que mejores prestaciones globales ofrece en términos de descarte de TUs al priorizar de forma directa las conexiones en función del retardo relativo acumulado por sus paquetes. Esta estrategia resulta especialmente indicada para escenarios con servicios con diferentes cotas de retardo. Es por esto que dicha estrategia M-LDF será la considerada para las simulaciones recogidas en el capítulo siguiente, donde se presentan algoritmos que aplican un reuso más agresivo de los recursos frecuenciales, asignando varias veces cada RB dentro de la celda trisectorizada.

Capítulo 5

Reúso Intensivo de Recursos Radio dentro de la Celda

En el capítulo anterior se han propuesto diversas soluciones para la asignación de recursos radio en sistemas de reúso unidad a nivel de celda. En este caso, los RBs de la subbanda interior pueden ser asignados por cualquier sector de la celda, pero solamente uno de los sectores transmitirá información en él. O lo que es lo mismo, cada RB puede utilizarse una sola vez dentro de la celda. En este caso, la interferencia intercelular es el factor limitante, por lo que los usuarios situados en el exterior de la celda son los que observan en general unas peores condiciones de canal. Sin embargo, los usuarios del interior de la celda están más aislados frente a ella por encontrarse más alejados de las fuentes interferentes y más próximos a la fuente de señal útil. Cabría plantearse por tanto aprovechar este exceso de margen de interferencias para la aplicación de esquemas de reúso intensivo en la zona interior de la celda, donde los RBs pueden ser reutilizados dentro de la propia celda hasta un máximo de una vez por sector. Este tipo de esquema se denomina reúso unidad a nivel de sector y permiten incrementar la capacidad de la celda a costa de un incremento de la variabilidad de la interferencia intercelular, como resultado de que un RB puede

ser asignado una o varias veces y por distintos sectores cada vez, y también de la aparición de la interferencia intersector como factor limitante para las prestaciones de ciertos usuarios, especialmente de aquellos situados en la zona de frontera entre sectores.

En la realidad no es posible obtener un nivel de reuso de todos los RBs de hasta tres veces por celda debido a dos factores fundamentalmente: en primer lugar, es necesario mantener las restricciones descritas en capítulos anteriores para combatir la interferencia intercelular, por lo que seguirá existiendo una subbanda exterior donde los usuarios del exterior de celdas contiguas recibirán asignaciones de forma ortogonal. El reuso unidad a nivel de sector se circunscribe únicamente a los RBs de la subbanda interior, donde las condiciones de interferencia intercelular son mejores. Por otro lado, debido a que las antenas de los sectores no radian idealmente solo en su propio sector, parte de la potencia transmitida alcanza a los usuarios situados en los otros sectores de la celda, apareciendo interferencia intersector al aplicar reuso de RBs dentro de la celda. Este efecto es especialmente perjudicial para los usuarios situados en la frontera entre sectores, pues la potencia recibida del sector útil y del interferente puede ser similar [Charafeddine y Paulraj, 2009]. La SINR en esta zona vendrá principalmente determinada por la relación de potencia transmitida en cada RB entre los sectores de la celda y la ganancia respectiva de cada antena. El problema de la interferencia intersector es por tanto similar al de la interferencia intercelular pero a menor escala. Sin embargo, en el caso de la interferencia intersector, el scheduler de la estación base controla las asignaciones de recursos que se realizan tanto en el sector interferente como en el interferido, por lo que se pueden tomar medidas especiales para controlar el impacto de dicha interferencia. La solución a esta cuestión pasa generalmente por aplicar restricciones en el acceso a los recursos radio de los usuarios situados en la frontera entre sectores para mejorar las condiciones observadas por dichos usuarios. Así, debido a todas estas

restricciones, el grado de reúso efectivo dentro de la celda será mucho menor que el máximo teórico.

La práctica totalidad de las propuestas que pueden encontrarse en la literatura para el reúso unidad a nivel de sector bajo un esquema FFR [Sternad y otros, 2003; Xiang y otros, 2007; Taranetz y otros, 2011] mitigan la interferencia intersector en la frontera entre sectores aplicando un reúso 3 para estos usuarios, es decir, entienden la zona de frontera como una prolongación de la zona exterior de la celda, donde ya se aplicaba dicho reúso para hacer frente a la interferencia intercelular. Este planteamiento evita que los usuarios de la frontera sufran la interferencia intersector pero limita enormemente la ganancia que puede obtenerse del reúso intensivo ya que pocos RBs van a poder ser reutilizados dentro de la celda. Con el fin de evitar esta infrutilización de recursos, algunas propuestas definen una subbanda de frontera [Sezginer y Sari, 2009] donde se aplica un reúso unidad a nivel de celda, evitando también la aparición de interferencia intersector pero con un reúso más eficiente. Sin embargo, no existen propuestas que analicen en profundidad las posibilidades de reúso que esta nueva subbanda ofrece. Por ejemplo, y tal y como se mostrará más adelante, es posible que un sector reutilice los RBs asignados en la subbanda de frontera opuesta, con lo que se obtiene un mejor aprovechamiento de los mismos. Por otro lado, a la hora de reutilizar recursos de otros sectores, en la mayor parte de las propuestas no se aplica ninguna restricción, pero parece más lógico mantener la interferencia más estable intentando reutilizar primero los RBs dos veces antes de pasar a reutilizarlos por tercera vez [Wang y otros, 2008]. En cualquier caso, no se han encontrado estudios que analicen la ganancia obtenida por los esquemas de reúso unidad a nivel de sector frente a reúso unidad a nivel de celda, y cómo de lejos está la capacidad obtenida del valor teórico. En este capítulo se abordará dicho estudio generalizando los algoritmos diseñados en el capítulo 4 para un escenario con reúso unidad a nivel de sector.

La información de “posición”, relativa a la ubicación del usuario dentro del área de cobertura del sector, resulta vital para poder aplicar esquemas de reuso tan agresivos como el planteado. Es importante determinar qué usuarios se encuentran en las zonas susceptibles de experimentar una fuerte interferencia intersector con el fin de ofrecerles un trato diferenciado del resto de usuarios interiores y mejorar así sus condiciones de canal. La información de posición de un usuario puede obtenerse mediante diversos sistemas de posicionamiento, como GPS (*Global Positioning System*) o TDOA (*Time Difference Of Arrival*), o bien mediante medidas de canal por parte de los UEs que son posteriormente transmitidas a la BS para dar soporte al scheduling. Sin embargo, las prestaciones de los algoritmos de asignación de recursos propuestos no deben exigir un nivel de precisión muy elevado en cuanto a la localización del usuario. La precisión de un sistema GPS asistido proporcionará unos resultados similares al conocimiento ideal de la localización del usuario. De hecho, lo realmente importante es conocer la localización relativa de los usuarios dentro del área de cobertura de cada sector, pudiendo determinar si un usuario se encuentra en la zona de interferencia de un sector colindante. Así, la ubicación del usuario se computará por medio de la combinación de los datos obtenidos de métodos de posicionamiento, como por ejemplo GPS, junto con medidas del enlace radio para determinar el nivel de interferencia de sectores vecinos. El UE estimará la potencia relativa de cada sector, que es una medida que ya realiza el terminal de por sí para analizar potenciales handovers, e indicará a la BS si se encuentra en una zona de frontera entre sectores. Se puede asumir que dicha información es transmitida a la BS con la misma periodicidad que los CQIs.

En este capítulo se presentan diversas propuestas para la asignación de recursos en escenarios con reuso unidad a nivel de sector que consiguen incrementar la capacidad de la celda con respecto al reuso unidad a nivel de celda sin aumentar significativamente la complejidad de los dispositivos ni de los algoritmos de asignación. El apartado 5.1 muestra una evaluación preliminar

de los beneficios que puede ofrecer el reúso intensivo de RBs en cuanto a aumento de la capacidad de la celda. Posteriormente, en el capítulo 5.2 se propondrán una serie de algoritmos específicos que intentarán mejorar las condiciones de canal proporcionadas a los usuarios, y especialmente para aquellos situados en la frontera entre sectores que son los que ahora verán reducida su accesibilidad a los recursos. Una evaluación de dichos algoritmos en un escenario con un servicio con requisitos de retardo será presentada en el apartado 5.3.

5.1 Evaluación preliminar de la potencialidad del reúso unidad a nivel de sector

En este primer apartado se lleva a cabo una evaluación preliminar de la potencial ganancia en capacidad que podría obtenerse al aplicar el reúso unidad a nivel de sector frente al escenario de reúso unidad a nivel de celda considerado hasta el momento. Los algoritmos de asignación de recursos analizados en el capítulo anterior pueden aplicarse con ligeras modificaciones para el escenario de reúso unidad a nivel de sector. Como ya se demostró en dicho capítulo, las mejores opciones para la asignación de recursos con reúso unidad a nivel de celda tanto en FFR como en FFRopa pasan por considerar que la prioridad de scheduling se actualiza con cada asignación, lo que denominamos entonces como *Prioridad Dinámica*. Además, la implementación del algoritmo de gestión de recursos que posibilitaba mejorar la MCS antes de asignar RBs adicionales, adaptando la potencia en consonancia, resultaba más atractiva que asignar primero RBs adicionales y luego mejorar la MCS, que es una opción más conservadora desde el punto de vista de garantizar la tasa de error en condiciones de baja carga pero limita la accesibilidad al agotar rápidamente los RBs existentes en el sistema. La opción de mejorar la MCS en primer lugar se basaba en que un buen número de usuarios, principalmente los usuarios del

interior de la celda, observan unas condiciones de canal suficientemente buenas como para poder mejorar su MCS e incrementar su tasa servida. En el caso de reuso unidad a nivel de sector, la interferencia promedio observada por los usuarios será más alta que en el caso de reuso a nivel de celda, puesto que las asignaciones entre sectores dejan de ser ortogonales. Por tanto, los usuarios requerirán más potencia para alcanzar los requisitos de SINR de cada MCS, lo que a su vez generará más interferencia. El reuso de RBs será más complicado en el caso de los algoritmos que priorizan la asignación de MCSs elevadas antes que ocupar un mayor número de RBs, puesto que la SINR mínima exigida será mayor y es más difícil que pueda garantizarse al reutilizar el RB.

Para analizar el impacto de la interferencia intersector, vamos a considerar en esta evaluación inicial del reuso unidad a nivel de sector los algoritmos FFR y FFRopa tanto para la versión que prioriza la asignación de RBs adicionales (FFR-RB y FFRopa-RB), como la que tiende a utilizar MCSs altas (FFR-MCS y FFRopa-MCS). Así, al aplicar las modificaciones para dar soporte al reuso de RBs en la zona interior, hablaremos de los algoritmos *FFR-RB-R*, *FFRopa-RB-R*, *FFR-MCS-R* y *FFRopa-MCS-R*, que aplican reuso de RBs dentro de la subbanda interior mientras que en la subbanda exterior se sigue utilizando un reuso unidad a nivel de celda como el considerado en el capítulo anterior. De forma teórica, tomando como referencia los mismos parámetros de sistema que en los capítulos anteriores (27 RBs totales), si los 18 RBs de la subbanda interior se pueden asignar teóricamente hasta en 3 ocasiones, el número promedio de usuarios asignables pasaría de 27 en reuso unidad a nivel de celda a $18 \cdot 3 + 9 = 63$ en reuso unidad a nivel de sector, lo que implica un aumento de capacidad del 133%. Como se demostrará más adelante, este factor es inalcanzable en condiciones realistas debido a que la interferencia intersector impide reutilizar tan intensivamente los recursos al no ser posible garantizar el cumplimiento de los requisitos de SINR de los usuarios previamente asignados.

Los algoritmos de reúso a nivel de sector aquí considerados intentarán asignar primero todos los RBs una vez antes de comenzar a reutilizar los de otros sectores. Esta filosofía evita la generación innecesaria de interferencias intersector por el reúso de RBs cuando todavía quedan RBs libres. Para los algoritmos basados en FFR (FFR-RB-R y FFR-MCS-R), cuando todos los RBs de la subbanda interior hayan sido asignados una vez, se comienza a aplicar el reúso de RBs, por el que un sector puede asignar RBs ya asignados en otros sectores de la celda, siempre y cuando se garantice el cumplimiento de los requisitos de SINR del usuario previamente asignado al considerar la interferencia intersector añadida. Además, se priorizará el reúso de todos los RBs una vez (asignados 2 veces dentro de la celda) antes de comenzar a reutilizarlos por segunda vez, con el fin de evitar que existan RBs con alta interferencia intersector porque se han asignado 3 veces mientras otros se han asignado solo una vez. Para el caso de los algoritmos basados en FFRopa (FFRopa-RB-R y FFRopa-MCS-R), una vez asignados los RBs pertenecientes a la subbanda preasignada al sector, se comienzan a asignar RBs de otros sectores siguiendo el ordenamiento frecuencial, empezando por los RBs que todavía queden libres. Al igual que en el caso de FFR, los RBs solo comienzan a reutilizarse cuando todos los RBs se han asignado ya al menos una vez. Incluso cuando se reutilizan RBs de otros sectores, es obligatorio mantener la ordenación, de modo que en la medida de lo posible, los picos de interferencia queden restringidos a un subconjunto de RBs.

5.1.1 Resultados de la evaluación preliminar

5.1.1.1 Condiciones de simulación

Para la evaluación preliminar de las potencialidades del reúso unidad a nivel de sector vamos a considerar el mismo modelo completo del sistema utilizado en el capítulo anterior. Los usuarios se distribuyen uniformemente a lo largo del

área de cobertura de la celda y se desplazan a 3km/h enviando CQIs de acuerdo con el procedimiento descrito en el capítulo 4. Igual que en las simulaciones del capítulo anterior, cada usuario generan un flujo ON-OFF con retransmisión de paquetes erróneos y con una cota de retardo máximo $D_{max}=50ms$ tras la que los paquetes son descartados. Como criterio de QoS se fija la garantía de una tasa de descarte de TUs objetivo del 1%. El objetivo es por tanto evaluar la capacidad del sistema en términos de número de usuarios soportados tal que se garantice que la tasa de descarte se encuentra por debajo de ese valor. Para la priorización de las conexiones vamos a considerar la estrategia M-LDF pues es la que mejores prestaciones globales ofrece de entre las evaluadas en el capítulo 4.

En un sistema con reuso unidad a nivel de sector, la interferencia recibida por los usuarios de la zona interior presentará una componente debida a la ICI y otra componente de interferencia intersector. Esta interferencia global es la que el UE mide y envía a la BS por medio de los CQI. Puesto que la interferencia intersector depende de las decisiones de scheduling efectuadas por la estación base (que controla todos los sectores) y de las condiciones de canal del terminal, la estación base puede promediar y estimar qué parte de la degradación en el SINR producida en TTIs anteriores puede ser debida a la interferencia intersector. De este modo, puede aislar de forma aproximada la componente de ICI del valor de la interferencia global. A la hora de asignar recursos a un UE determinado, el scheduler deberá tener en cuenta por tanto no solo la ICI proveniente de otras celdas, sino también la interferencia intersector que pueden provocar las asignaciones previas en otros sectores, con el fin de satisfacer los requisitos de SINR de las distintas transmisiones.

Las máscaras de potencia transmitida por RB en cada subbanda para las distintas propuestas se muestran en la Tabla 5.1 y Tabla 5.2. Para su cálculo se ha asumido como en capítulos anteriores un incremento de 5dB en la potencia de transmisión de la subbanda exterior. A su vez, el factor de reuso de los RBs

debe tenerse en cuenta también a la hora de computar la potencia transmitida, pues debe asegurarse que incluso cuando todos los RBs del sistema se han asignado con reúso máximo (3 veces en la subbanda interior y 1 vez en la exterior), en ningún caso se exceda el límite máximo de potencia transmitida fijado en la celda.

Tabla 5.1: Máscaras de potencia para reúso unidad a nivel de celda

<i>Subbanda</i>	<i>Número de RBs/celda</i>	<i>M_{med} (dBm/RB)</i>	<i>M_{min} (dBm/RB)</i>	<i>M_{max} (dBm/RB)</i>
Interior	18	26	23	29
Exterior	9	31	31	31

Tabla 5.2: Máscaras de potencia para reúso unidad a nivel de sector

<i>Subbanda</i>	<i>Número de RBs/celda</i>	<i>M_{med} (dBm/RB)</i>	<i>M_{min} (dBm/RB)</i>	<i>M_{max} (dBm/RB)</i>
Interior	54 (18/sector x 3 sectores)	23.8	20.8	26.8
Exterior	9	28.8	28.8	28.8

5.1.1.2 Resultados de la simulación

La Figura 4.23 muestra una comparación entre los distintos algoritmos con reúso unidad a nivel de celda y de sector. La comparación se efectúa únicamente con los algoritmos FFR-MCS y FFRopa-MCS para el caso de reúso unidad a nivel de celda, puesto que como se vio en el capítulo 4, mejoraban las prestaciones de FFR-RB y FFRopa-RB. Los algoritmos con reúso unidad a nivel de sector basados en FFRopa mejoran la capacidad de la celda, pasando de 104 usuarios en FFRopa-MCS a 117 en FFRopa-RB-R y 115 en FFRopa-MCS-R, lo que supone un incremento del 12,5% y del 10,6% respectivamente en el número de usuarios soportados por la celda.

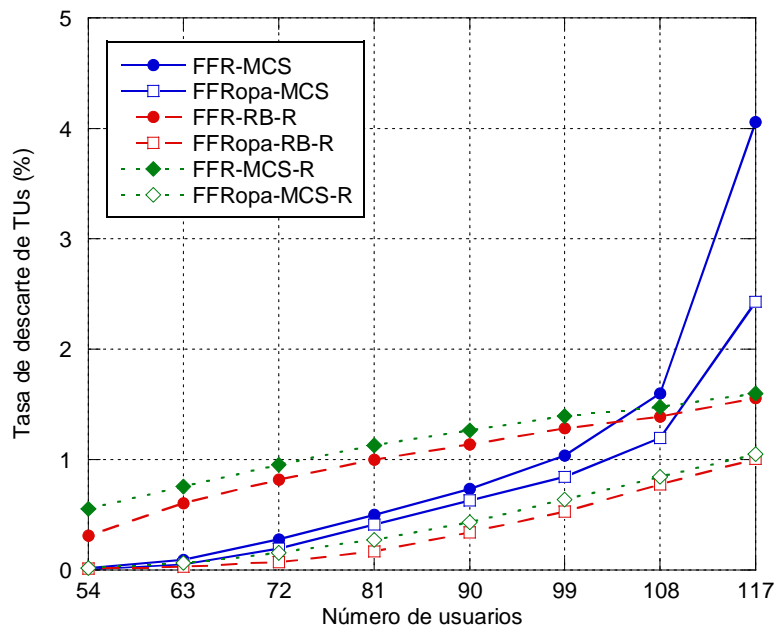


Figura 5.1: Prestaciones en el descarte de TUs al aplicar reuso a nivel de sector

En el caso del algoritmo FFR, se aprecia una elevada tasa de descarte incluso para carga baja y media puesto que no establece ningún control en la asignación de recursos frecuenciales en la subbanda interior. Esto supone que para el caso de reuso unidad a nivel de sector, la interferencia presenta una variabilidad elevada, lo que incrementa el error cometido en la asignación de recursos radio por a la imposibilidad de estimar adecuadamente el estado del canal. Para comprobar este extremo, se propone ahora un algoritmo intermedio entre FFR-RB-R y FFRopa-RB-R que hemos denominado *FFRs-RB-R* y que se basa en FFRopa-RB-R pero sin aplicar ordenación en la asignación de RBs, es decir, el scheduler se limitará a asignar primero RBs de la subbanda preasignada a cada sector antes de ocupar RBs de otros sectores, pero no se implementará el concepto de grupo inicial ni la ocupación ordenada. La aplicación de esta simple restricción en la asignación de RBs reduce drásticamente el descarte, como se muestra en la Figura 5.2a, debido a que limita significativamente la variabilidad de la interferencia y se cometen menos errores en la asignación de recursos. Como resultado, la tasa de BLER disminuye de forma importante (Figura 5.2b) y de ahí la reducción obtenida en el descarte.

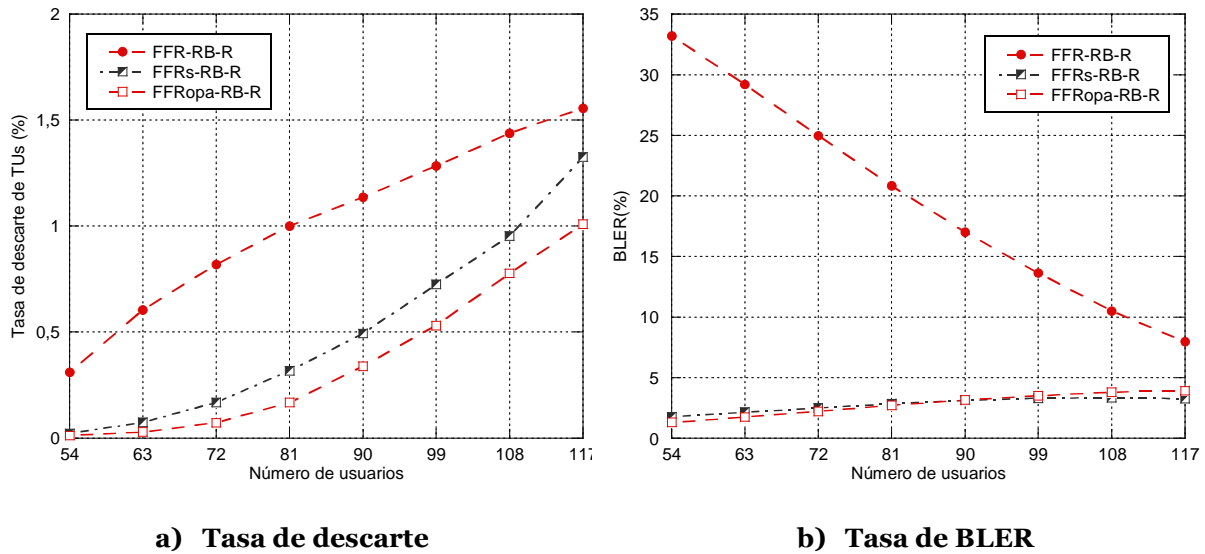


Figura 5.2: Impacto de la ordenación en el reúso unidad a nivel de sector

Si comparamos la opción de asignar RBs adicionales o mejorar la MCS para incrementar la tasa servida a los usuarios en la Figura 5.1, aunque la diferencia no es muy acusada, las simulaciones indican que asignar RBs adicionales obtiene un menor descarte tanto para FFR como FFRopa. Esto es debido a que si se mejora la MCS de un usuario, aumentan en consonancia sus requisitos de SINR. Por consiguiente, resulta más improbable que se puedan reutilizar sus RBs en otro sector y la ganancia frente a reúso unidad a nivel de celda no es tan elevada. En la Figura 5.3a se puede apreciar la diferencia en el *grado de reúso de RBs* para FFRopa-RB-R y FFRopa-MCS-R, definido como el número total de veces que se asignan los RBs de la subbanda interior con respecto al número total de RBs disponibles (un valor 1 indicaría que todos los RBs interiores se han asignado 1 vez, mientras que un valor 2 significaría que en promedio, todos los RBs interiores se han asignado 2 veces en todos los TTIs). Se puede ver que a medida que la carga de la celda crece, y por tanto con más frecuencia es necesario utilizar MCSs altas para recuperar retrasos en los servicios, el factor de utilización de RBs decrece, lo que a la larga aumenta el bloqueo en la celda. Sin embargo, cuando se prioriza la asignación de RBs adicionales, la MCS

5.1 Evaluación preliminar de la potencialidad del reuso unidad a nivel de sector

utilizada es más baja, con lo que la SINR requerida será menor y será más sencillo reutilizar el RB en otro sector, obteniendo de este modo un descarte menor. Además, el uso de MCSs elevadas hace que la transmisión de datos sea más sensible a las variaciones del canal, incrementándose el BLER como se puede observar en la Figura 5.3b. En cambio, dado que existe un elevado número de recursos radio disponibles para la retransmisión de paquetes erróneos gracias al reuso de RBs, este ligero aumento en el BLER no se traduce en un incremento importante de la tasa de descarte.

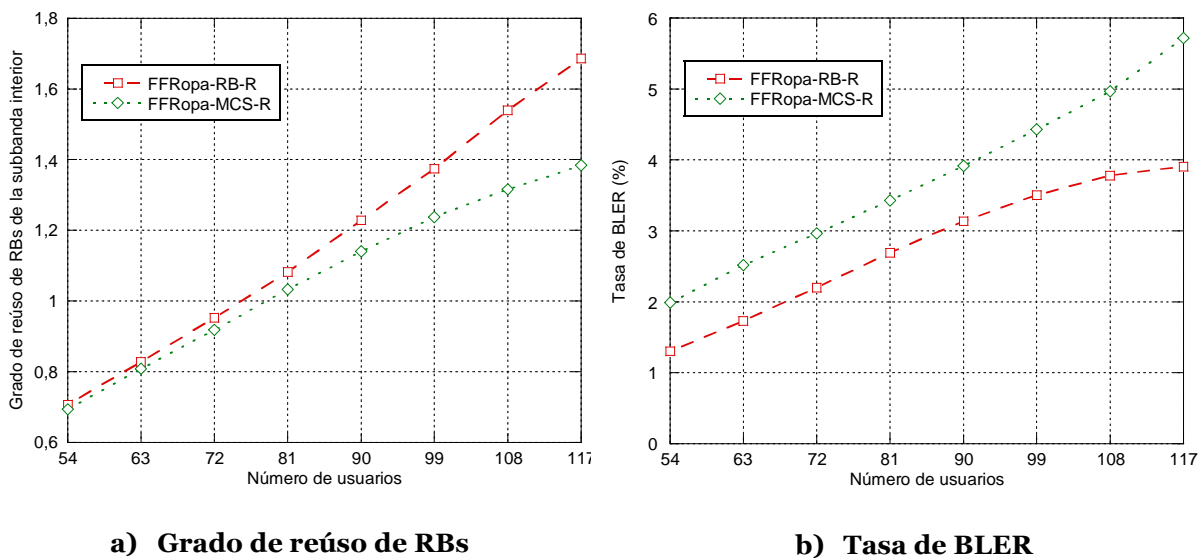


Figura 5.3: Comparación entre FFRopa-RB-R y FFRopa-MCS-R

El incremento de la interferencia promedio observada por los usuarios debido a la aparición de la componente intersector hace que la opción de asignar RBs adicionales resulte más adecuada. Esta será por tanto la opción considerada en el resto del capítulo. Es importante destacar que el incremento en capacidad mostrado anteriormente se obtiene aplicando directamente el reuso a nivel de sector sobre el esquema FFRopa, sin tomar medidas específicas para mejorar las condiciones de canal de los usuarios situados en la frontera entre sectores, que son los más sensibles a la interferencia en este nuevo escenario de interferencia inter- e intracelular. Es por tanto esperable una

mejora aún mayor en las prestaciones si se aplican mecanismos específicos para proteger a estos usuarios fronterizos, que será el objetivo de los algoritmos presentados en las siguientes secciones.

5.2 Propuestas específicas para la asignación de recursos con reúso unidad a nivel de sector

El efecto de la interferencia intersector es mucho más perjudicial en las proximidades de las fronteras entre sectores, donde dicha interferencia puede llegar a ser dominante con respecto a la ICI [Charafeddine y Paulraj, 2009]. Para combatir este efecto, los algoritmos propuestos en este apartado definen una nueva zona de reúso, denominada *zona de frontera* alrededor del límite entre sectores de una misma celda. Los UEs que pertenecen a dicha zona se denominan genéricamente *usuarios fronterizos* y recibirán un tratamiento especial con el fin de mejorar sus condiciones de canal. La anchura angular de la zona de frontera (θ_F) es un parámetro de diseño que condiciona el porcentaje de UEs de la celda que se consideran fronterizos y, por tanto, la cantidad de recursos que serán dedicados a ellos. La Figura 5.4 muestra un ejemplo gráfico de la definición de la zona de frontera en el área interior de una celda trisectorizada.

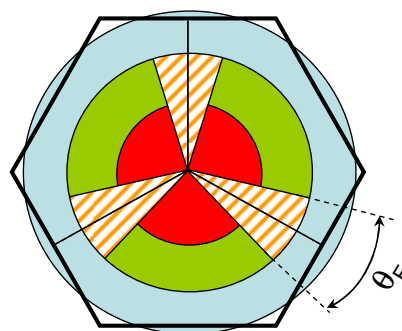


Figura 5.4: Definición de la zona de frontera

5.2 Propuestas específicas para la asignación de recursos con reuso unidad (...)

Los siguientes subapartados describen las propuestas realizadas para la asignación de recursos radio en sistemas de reuso unidad a nivel de sector. Partiendo de un esquema FFRopa-RB-R, que es el que mejores prestaciones ofrecía de acuerdo con la evaluación preliminar mostrada en el apartado 5.1, se definirán una serie de esquemas orientados a mejorar las prestaciones de los usuarios fronterizos. En primer lugar se va a analizar la opción simple de tratar a los usuarios fronterizos como usuarios exteriores, asignándolos en la subbanda exterior donde se aplica un reuso 3. Posteriormente se explorarán las posibilidades de definir una subbanda específica para los usuarios de frontera con diferentes restricciones de asignación. Finalmente, se propondrán una serie de algoritmos que asignan a los usuarios de frontera dentro de la subbanda interior pero aplicando restricciones adicionales para la asignación de usuarios no fronterizos con el fin de mejorar las condiciones observadas por los primeros.

5.2.1 Usuarios fronterizos como usuarios exteriores

La solución más simple para mejorar las prestaciones de los usuarios fronterizos es considerarlos como usuarios exteriores, de modo que reciban asignaciones en la subbanda exterior. En esta subbanda no se aplica reuso de RBs, con lo que no aparecerá el problema de la fuerte interferencia intersector. Además, como se aplica coordinación por sectorización con las celdas vecinas, la interferencia intercelular también se verá reducida. Así, si aplicamos esta restricción sobre el algoritmo FFRopa-RB-R obtenemos el algoritmo *FSRopa* (Fractional Sector Reuse con ordenación y adaptación de potencia), cuyo modelo de despliegue se muestra en la Figura 5.5. El tamaño de la subbanda exterior debe entonces aumentarse para absorber el incremento de tráfico gestionado por esta subbanda debido a los usuarios de frontera.

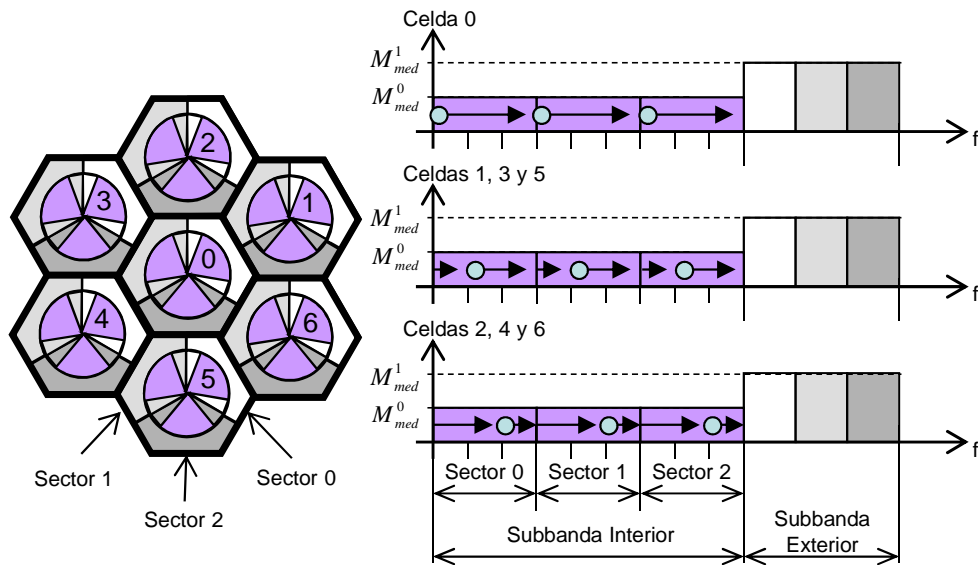


Figura 5.5: Esquema de despliegue del algoritmo FSRopa

5.2.2 Usuarios fronterizos en una subbanda específica

En FSRopa, los usuarios fronterizos reciben recursos en la subbanda exterior aunque por condiciones de canal pudieran recibir recursos en la subbanda interior, con menor consumo de potencia. Al incrementar la utilización de los recursos de esta subbanda, la interferencia observada por las celdas vecinas es mayor. Esto puede limitar la accesibilidad de los usuarios exteriores, quienes realmente necesitan acceder en dicha subbanda, aumentando el descarte en dicha zona. Es por esto que proponemos una segunda opción en la que los usuarios de frontera reciben asignaciones en una subbanda específica, la *subbanda de frontera*, que tiene una potencia de transmisión igual a la subbanda interior y cuyos RBs no pueden ser reusados dentro de la celda. El tamaño de la subbanda de frontera es un parámetro de diseño del sistema, que tiene relación con la anchura angular considerada para la zona de frontera. De este modo, si el número promedio esperable de usuarios en la frontera es n_F , y para cursar su tasa deseada con la MCS objetivo se requieren $N_{F,RB}$ RBs, este será el tamaño fijado para la subbanda de frontera. El resto de RBs de baja potencia conforman

la subbanda interior, en la que se aplica un ordenamiento y adaptación de potencia similar a FSRopa.

Se evaluarán tres posibles implementaciones de esta subbanda de frontera, tal y como se detalla a continuación:

5.2.2.1 FSRopa-FS_Sec: FSRopa estático y subbanda de frontera sectorizada

El algoritmo FSRopa-FS_Sec considera una subbanda de frontera sectorizada con reuso unidad a nivel de celda, como se muestra en la Figura 5.6. De este modo, se elimina la interferencia intersector y se reduce la interferencia intracelular puesto que el sector de la celda vecina más interferente en una determinada frontera, no transmite potencia en los RBs de dicha frontera.

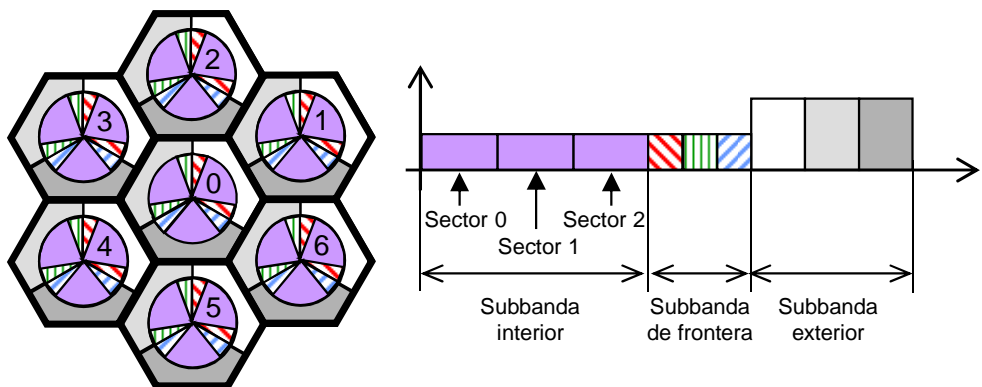


Figura 5.6: Definición de subbandas en el algoritmos FSRopa-FS_Sec

En la primera etapa del algoritmo FSRopa-FS_Sec, los usuarios fronterizos son los únicos que pueden recibir recursos de la subbanda de frontera. Si por condiciones de canal no son capaces de recibir recursos en ella, podrán recibir asignaciones en la subbanda exterior. Si tras la asignación de recursos a los usuarios fronterizos quedan RBs libres en la subbanda de frontera, estos podrán ser ocupados por usuarios no fronterizos del sector correspondiente (la sectorización en la subbanda de frontera es rígida) con el fin de aumentar la utilización del espectro. Del mismo modo, si la banda de frontera está

completamente asignada y algún usuario fronterizo requiere RBs adicionales, este podrá recibir recursos en la subbanda interior si es capaz de lograr la SINR objetivo aun cuando el RB esté reutilizado.

5.2.2.2 *FSRopa-FS_Est*: FSRopa estático y subbanda de frontera no sectorizada

En el algoritmo *FSRopa-FS_Est*, a diferencia de *FSRopa-FS_Sec*, no se aplica sectorización en la subbanda de frontera, sino que en ella se utiliza un mecanismo de asignación similar a FFR en el que los usuarios fronterizos reciben asignaciones en los RBs de la subbanda de frontera en los que experimentan las mejores condiciones de canal (Figura 5.7). Por tanto, se obtiene una mayor accesibilidad a los recursos de la frontera a cambio de un aumento de la variabilidad de la interferencia. El resto del algoritmo es similar a *FSRopa-FS_Sec*.

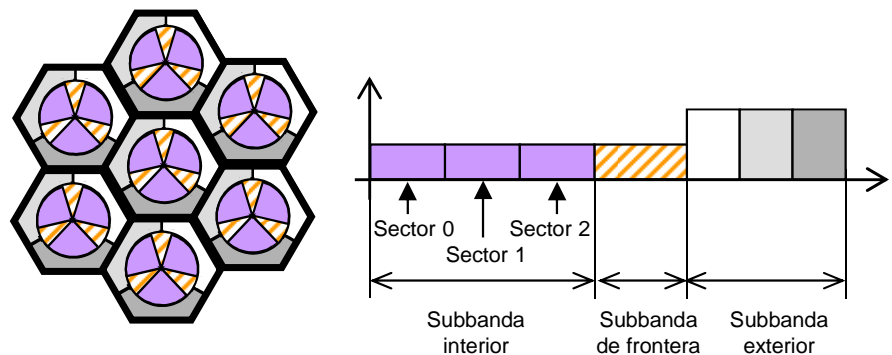


Figura 5.7: Definición de subbandas en el algoritmos *FSRopa-FS_Est*

5.2.2.3 *FSRopa-FS_Din*: FSRopa dinámico y subbanda de frontera

El algoritmo *FSRopa-FS_Din* es similar a *FSRopa-FS_Est* con la diferencia de que el reparto de recursos entre las subbandas interior y de frontera es dinámico, en el sentido de que en cada TTI se realiza un ajuste del tamaño de las subbandas en función del número de usuarios activos de cada tipo (fronterizos y no fronterizos). La idea de este algoritmo es aumentar la accesibilidad a los

recursos mediante el ajuste del número de RBs de cada subbanda de acuerdo a la carga real experimentada en cada subtrama. Como en el caso anterior, una relajación en las restricciones de asignación implica un aumento en la variabilidad de la interferencia que será necesario analizar.

El algoritmo de ajuste del tamaño de las subbandas es como sigue: al inicio de cada TTI se realiza una estimación de los RBs necesarios para cursar la tasa requerida por los UEs fronterizos con tráfico activo en ese TTI haciendo uso de su MCS objetivo. Este valor determina el tamaño fijado para la subbanda de frontera en dicho TTI. Dado que el ajuste dinámico de la subbanda de frontera modifica a su vez el tamaño de la subbanda interior, se ha optado por no establecer límites fijos al tamaño de las particiones preasignadas a cada sector, sino que se adaptan también dinámicamente en cada TTI de forma proporcional al número de usuarios con tráfico activo en cada uno de ellos: más RBs de la subbanda interior son preasignados a la subbanda del sector con un mayor número de usuarios activos. Para definir el tamaño de estas subbandas no se consideran los UEs fronterizos pues teóricamente serán asignados en la subbanda de frontera. Una vez definidos los tamaños de las distintas subbandas, el algoritmo procede de forma similar a FSRopa-FS_Est.

5.2.3 *Usuarios fronterizos en la subbanda interior*

La tercera opción planteada para la gestión de los usuarios fronterizos pasa por asignarlos en un subconjunto de RBs de la subbanda interior en los que se aplican ciertas restricciones de acceso, lo que en definitiva supone crear una subbanda de frontera virtual dentro de la propia subbanda interior. Partiendo de un despliegue similar a FFRopa-RB-R, asumamos que los primeros $N_{F,RB}$ RBs de la subbanda interior preasignada a cada sector se configuran para asignar a los usuarios de frontera. El acceso a estos RBs es sectorizado, es decir, solo los UEs fronterizos de un sector pueden acceder a los RBs de la subbanda

de frontera mapeados en la partición de dicho sector (Figura 5.8). Este algoritmo lo hemos denominado *FSRopa-VF* (FSRopa con frontera virtual).

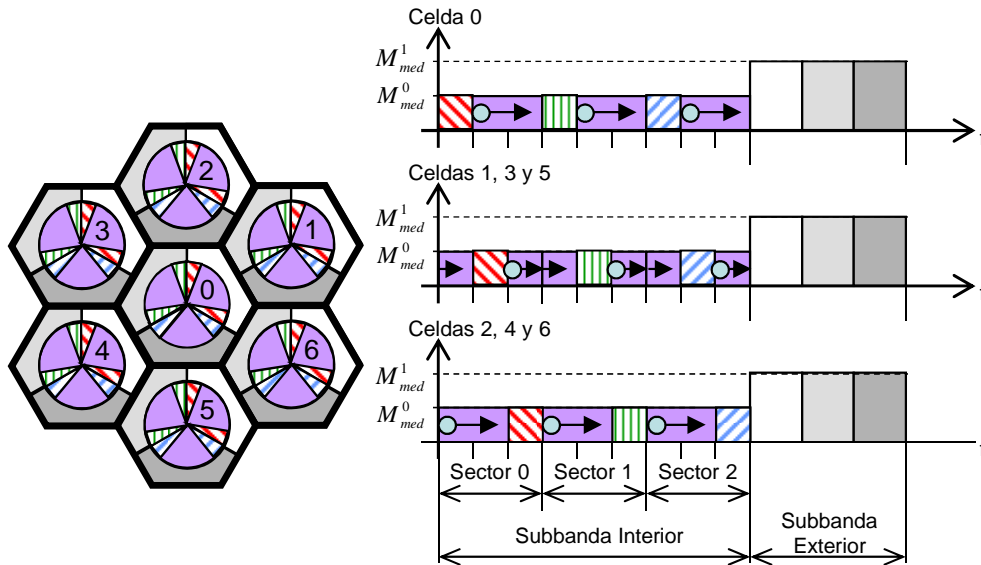


Figura 5.8: Esquema de despliegue del algoritmo FSRopa-VF

En la primera iteración del algoritmo, los usuarios fronterizos recibirán asignaciones en la subbanda virtual de frontera y los RBs que reciban no serán reasignados dentro de la celda. Si tras la asignación de los usuarios de frontera quedan RBs de frontera libres, estos pasarán a formar parte de la subbanda interior en la partición del sector correspondiente, con lo que podrán ser reutilizados completamente dentro de la celda. Luego, el algoritmo fluye como FFRopa-RB-R.

A modo de ejemplo, vamos a tomar el modelo de sistema típico que hemos venido utilizando en esta tesis (la subbanda interior consta de 18 RBs, 6 preasignados para cada sector) y asumamos que un total de $N_{F,RB}=2$ RBs se utilizan para la frontera en cada sector. En tal caso, un ejemplo gráfico del algoritmo FSRopa-VF se puede ver en la Figura 5.9. Los números representan el índice de los RBs asignables por cada sector en la zona interior (recordemos que

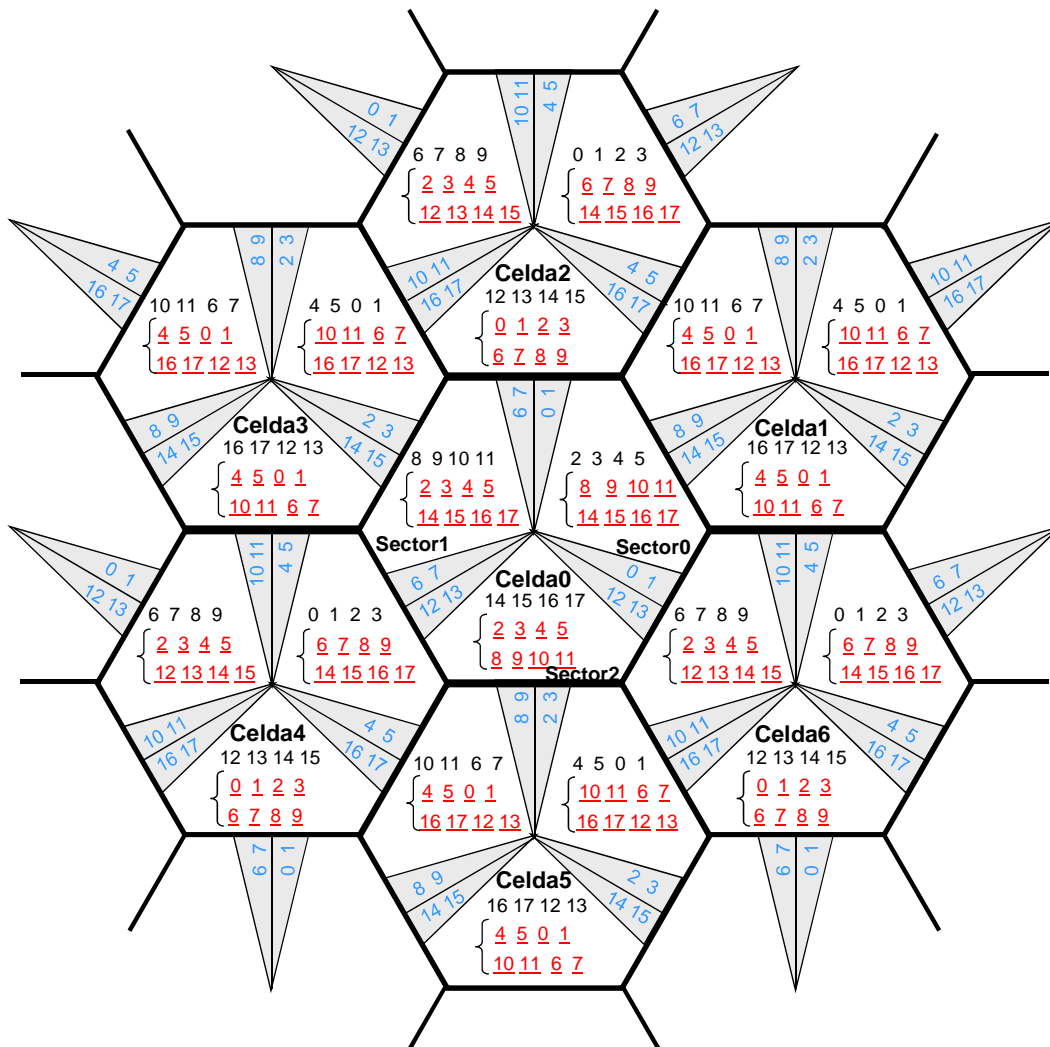


Figura 5.9: RBs asignables en el interior y frontera con FSRopa-VF en cada sector

en el modelo típico para FFRopa, el sector 0 asigna en primer lugar los RBs del 0 al 5, el sector 1 del 6 al 11 y el sector 2 del 12 al 17, con el decalado correspondiente en cada celda). Los números en azul situados en las fronteras son los RBs utilizados para asignar a los usuarios fronterizos en cada sector. Para cada uno de los sectores, la primera línea en color negro representa los RBs de la subbanda interior (descontando los utilizados en la frontera) que pertenecen a su partición y que por tanto asignará en primer lugar. Una vez asignados todos ellos, el sector comienza a reutilizar RBs de los sectores adyacentes, que se corresponden con los números subrayados en rojo. El orden

en el que se muestran los RBs se corresponde con la secuencia en la que serían asignados de acuerdo con el ordenamiento de asignación de RBs seguido en cada celda con el algoritmo FFRopa. Recordemos que a la hora de reutilizar RBs de otros sectores, en primer lugar se asignarán los RBs que queden libres en otros sectores para después comenzar a reutilizar los ya asignados, primero todos una vez y finalmente por segunda vez. Por razones de visualización en la Figura 5.9 no se incluyen los RBs asignados en el exterior, que sí se muestran en la Figura 5.10.

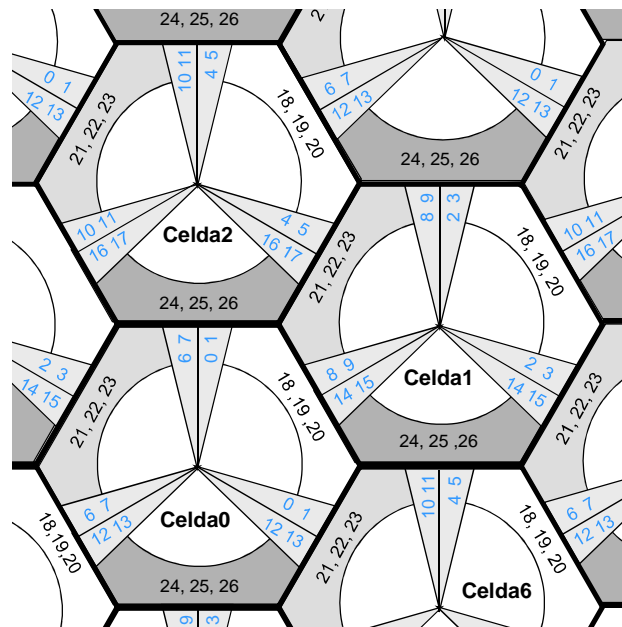


Figura 5.10: RBs asignables en el exterior y en la frontera con FSRopa-VF

Además de esta versión inicial del algoritmo FSRopa-VF, a continuación se proponen una serie de modificaciones sobre el esquema base encaminadas fundamentalmente a dos aspectos: incrementar el acceso de los usuarios y mejorar las condiciones de ICI experimentadas por los usuarios de frontera. Para un seguimiento más sencillo, en la Figura 5.11 se muestran ejemplos particularizados para la celda 0 del procedimiento de cada propuesta planteada.

5.2 Propuestas específicas para la asignación de recursos con reúso unidad (...)

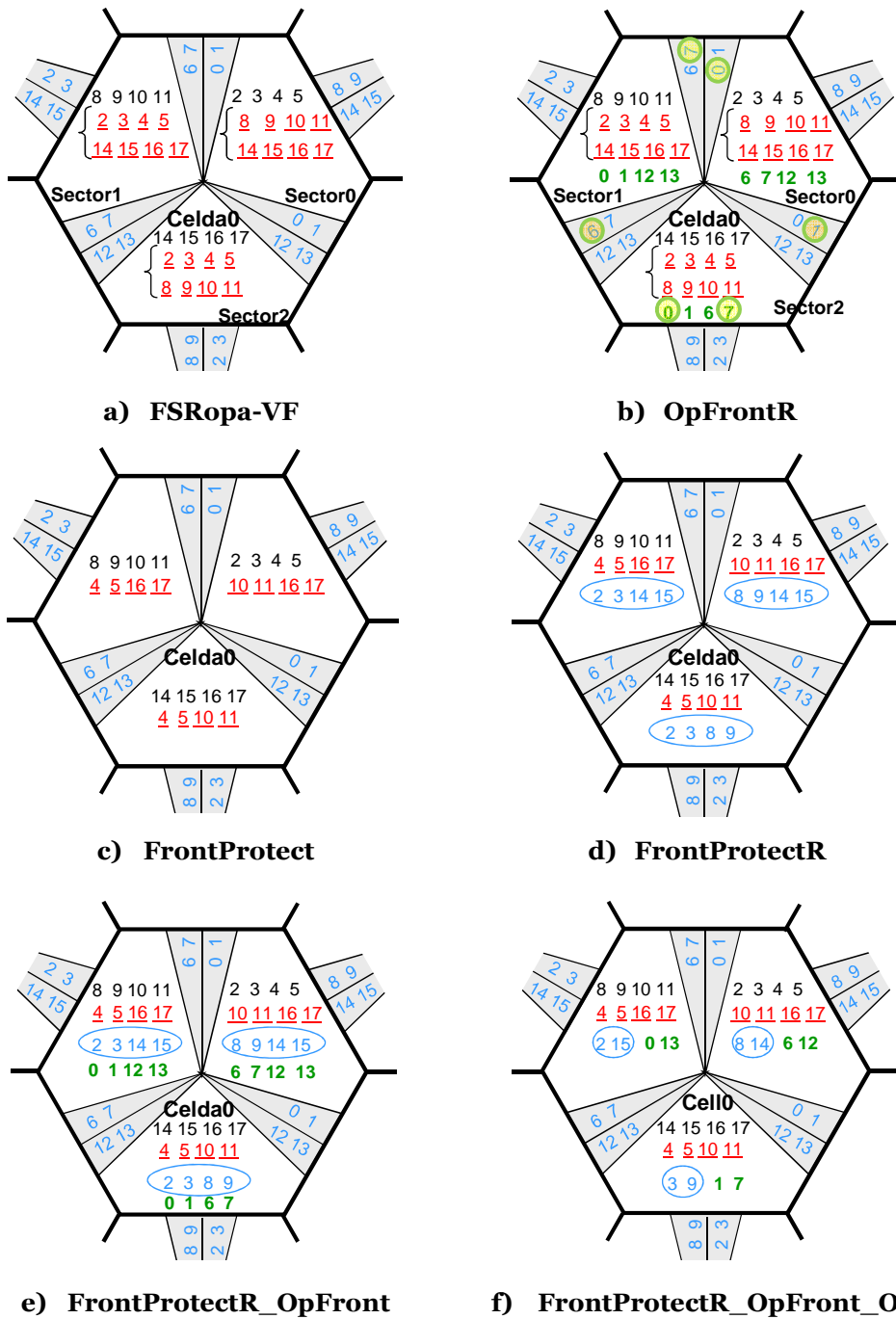


Figura 5.11: Ejemplos de asignación de RBs para las variantes de FSRopa-VF

5.2.3.1 OpFrontR: Reúso de la frontera opuesta

Si un sector ha reutilizado ya hasta el máximo los RBs interiores de otros sectores pero necesita más recursos para cubrir su demanda de tasa, entonces

puede reutilizar los RBs asignados en la frontera opuesta dentro de su propia celda, puesto que es la que estará más aislada de su interferencia intersector. En el ejemplo de la Figura 5.11b, en la frontera entre los sectores 0 y 1, de entre los cuatro RBs posibles (0, 1, 6 y 7) se han asignado los RBs 0 y 7. Cuando el sector 2 experimenta una elevada carga y requiere más RBs para el interior, reasigna estos RBs, aunque no hace lo mismo con los RBs 1 y 6, por haber sido estos asignados en una frontera adyacente. Este algoritmo reduce el bloqueo de usuarios al incrementar el número de recursos asignables a costa de un empeoramiento puntual de las condiciones de interferencia observadas por los usuarios de frontera.

5.2.3.2 *FrontProtect*: Protección de las fronteras de otras celdas

El objetivo de esta propuesta es mejorar las condiciones de ICI experimentadas por los usuarios de frontera, ya que debido al despliegue elegido, una frontera se encuentra siempre en la dirección de máxima radiación de un sector de otra celda. Así, cuando un sector comienza a reutilizar RBs de otros sectores, aquellos RBs potencialmente asignables en la frontera más próxima de la celda vecina no podrán ser asignados. En el ejemplo de la Figura 5.11c, el sector 0 de la celda 0 no puede asignar los RBs 8, 9, 14 y 15 porque pueden ser utilizados en la frontera de la celda vecina.

5.2.3.3 *FrontProtectR*: Reúso de los RBs protegidos

Dado que en la variante anterior se reduce el número de RBs que pueden ser asignados por cada sector en la subbanda interior, pueden aparecer situaciones de bloqueo debido a la falta de RBs. Es por esto que en esta nueva variante se propone que si un sector sigue precisando recursos tras reutilizar al máximo todos los demás RBs interiores, se puedan asignar los RBs reservados para proteger las fronteras de otras celdas. Esto provocará naturalmente un incremento de la ICI observada en las celdas vecinas. El conjunto total de RBs

potencialmente utilizables en un sector vuelve a ser el mismo que en el FSRopa-VF. Sin embargo, puesto que estos RBs de protección solo llegarán a ser asignados cuando un sector experimente una carga elevada, se reduce la probabilidad de que tal interferencia exista con respecto al caso de no protección de la frontera, como es el caso del algoritmo FSRopa-VF estándar. Así, en la Figura 5.11d podemos comprobar que ahora se permite la asignación de estos RBs protegidos (en azul y rodeados por una elipse) pero una vez se hayan asignado y reutilizado completamente el resto de RBs interiores.

5.2.3.4 *FrontProtectR_OpFrontR*: Reuso de los RBs protegidos y de la frontera opuesta

En esta variante se permite el reuso de los RBs protegidos, como en el caso anterior, pero si todavía se necesitan más RBs, también se pueden ocupar RBs de la frontera opuesta, como era el caso de OpFrontR. Por tanto, esta opción permite una utilización de recursos cercana al máximo. Como resultado de esto, un mismo RB puede ser asignado prácticamente por todos los sectores del escenario, lo que llevará la interferencia a valores excesivos para muchos usuarios pero la accesibilidad a los recursos será muy alta. Un ejemplo gráfico de esta asignación se observa en la Figura 5.11e.

5.2.3.5 *FrontProtectR_OpFrontR_Ort*: *FrontProtectR_OpFrontR* y asignación ortogonal

En esta última propuesta se pretende reducir el nivel de interferencia provocado por la variante anterior añadiendo restricciones en el reuso de RBs de la frontera, con el fin de limitar el número de sectores que pueden utilizar simultáneamente el mismo RB. Básicamente, la solución propuesta pasa por reducir el número de RBs protegidos que un sector puede reutilizar a 2 de entre los 4 posibles, y lo mismo en los RBs de la frontera opuesta. Seleccionando con cuidado qué RBs se pueden reutilizar en cada sector se evita que varios sectores

de la misma celda reutilicen el mismo RB de frontera, con lo que baja el nivel de interferencia en ellos. En la Figura 5.11f se muestra el ejemplo concreto de la celda 0, pudiendo obtenerse los valores para el resto de celdas siguiendo el mismo procedimiento.

5.3 Evaluación de los algoritmos de asignación de recursos con reúso unidad a nivel de sector

5.3.1 Condiciones de simulación

Los algoritmos presentados en este apartado se evaluarán a continuación en las mismas condiciones descritas en el apartado 5.1.1.1. Para no aumentar innecesariamente la complejidad exigida a los terminales, vamos a asumir que no se requiere el apoyo de ningún mecanismo preciso de posicionamiento del usuario, sino que el terminal solo deberá reportar a la BS si se encuentra en una zona de frontera o no, además de los CQIs con las medidas del estado del canal que se han venido utilizando en las simulaciones anteriores. Para determinar si el usuario se encuentra en una zona de frontera, basta con realizar un promediado a lo largo del tiempo de la potencia observada en las subportadoras piloto del sector útil y del sector más interferente de la propia celda. Si ese valor está por encima de un cierto umbral, el UE reporta a la BS una indicación de que es un usuario fronterizo.

Para la parametrización de los distintos algoritmos de reúso unidad a nivel de sector, vamos a considerar una zona de frontera de $\theta_F=34^\circ$, que se corresponde con el área en el que la SINR es inferior a 10dB como resultado de la interferencia intersector proveniente del sector más próximo. Esta área supone el 28,3% de la superficie de la zona interior de la celda, por lo que se ha decidido que 6 RBs de los 18 que componen la subbanda interior sean asignados a la subbanda de frontera en los algoritmos FSRopa-FS y FSRopa-VF.

5.3 Evaluación de los algoritmos de asignación de recursos con reuso unidad (...)

Las máscaras de potencia de cada algoritmo deberán adaptarse al factor de reuso de RBs en cada caso, de modo que aun cuando una celda transmita todos los RBs con reuso máximo, no se supere el límite de potencia máxima fijada en la celda. Los valores considerados para las máscaras de potencia se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5.3: Máscaras de potencia para el algoritmo FSRopa

Subbanda	Número de RBs/celda	M_{med} (dBm/RB)	M_{min} (dBm/RB)	M_{max} (dBm/RB)
Interior	36 (12/sector x 3 sectores)	23,5	20,5	26,5
Exterior+Frontera	15	28,5	28,5	28,5

Tabla 5.4: Máscaras de potencia para los algoritmos FSRopa-FS

Subbanda	Número de RBs/celda	M_{med} (dBm/RB)	M_{min} (dBm/RB)	M_{max} (dBm/RB)
Interior	36 (12/sector x 3 sectores)	24,5	21,5	27,5
Frontera	6	24,5	21,5	27,5
Exterior	9	29,5	29,5	29,5

Tabla 5.5: Máscaras de potencia para los algoritmos FSRopa-VF

Subbanda	Número de RBs/celda	M_{med} (dBm/RB)	M_{min} (dBm/RB)	M_{max} (dBm/RB)
Interior+Frontera	54* (18/sector x 3 sectores)	23,8	20,8	26,8
Exterior	9	28,8	28,8	28,8

* Dependiendo del algoritmo concreto. 54 es el valor máximo.

5.3.2 Resultados de las simulaciones

La Figura 5.12 recopila la tasa de descarte obtenida para los algoritmos FSRopa y FSRopa-FS en comparación con el esquema inicial FFRopa-RB-R. Los resultados indican que tanto en el global de la celda (Figura 5.12a) como en particular para los usuarios de frontera (Figura 5.12b), no se obtiene mejora en cuanto a la tasa de descarte con ninguno de estos esquemas. Cuando los usuarios son tratados como exteriores (FSRopa) o asignados en una subbanda

propia (FSRopa-FS), las condiciones de canal de dichos usuarios mejoran, pero se produce una reducción en la accesibilidad a los recursos debida a las nuevas restricciones impuestas, que acaba por aumentar el descarte de TUs en la celda. En el caso de FSRopa, la asignación de usuarios de frontera en la subbanda exterior conlleva un empeoramiento de las condiciones de interferencia experimentada en dicha subbanda, lo que incrementa el bloqueo de los usuarios del exterior de la celda. En el caso de FSRopa-FS_Sec y FSRopa-FS_Est, el hecho de definir una subbanda específica para la frontera mejora las condiciones de dichos usuarios pero reduce la libertad de asignación de los mismos a esta subbanda. Además, el tamaño de la subbanda interior se ve reducido a 12 RBs, frente a los 18 de FFRopa-RB-R, con lo cual será necesario reutilizar en mayor medida los RBs, empeorando así las condiciones de interferencia en la celda. Esto supone en definitiva un incremento general del descarte de TUs en toda la celda que lastra las prestaciones. Solo cuando se da un mayor grado de libertad en la configuración de las subbandas como sucede en FSRopa-FS_Din, se consigue una reducción en la tasa de descarte, llegando a resultados próximos a FFRopa-RB-R.

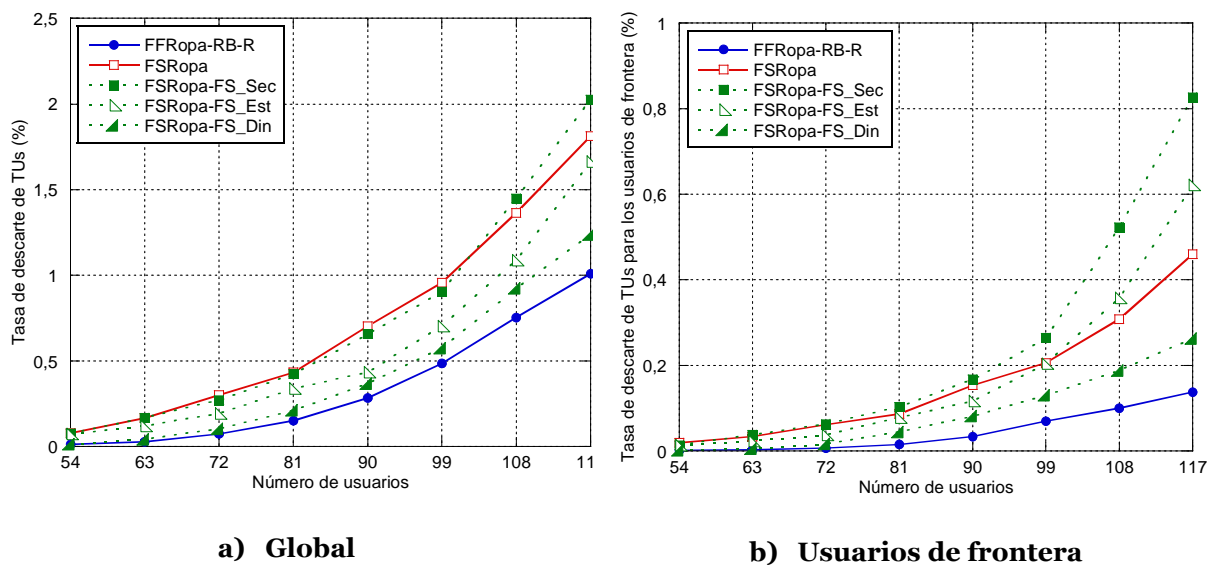


Figura 5.12: Tasa de descarte para los algoritmos FSRopa y FSRopa-FS

5.3 Evaluación de los algoritmos de asignación de recursos con reuso unidad (...)

Para confirmar lo dicho anteriormente, en la Figura 5.13 se representa la tasa de BLER obtenida por los usuarios de frontera para cada uno de los algoritmos. Los algoritmos que imponen más restricciones a la asignación de los usuarios de frontera (FSRopa, FSRopa-FS_Sec y FSRopa-FS_Est) son los que logran mejor BLER, pero su tasa de descarte es elevada. Por el contrario, cuando se considera el algoritmo FSRopa-FS_Din, la tasa de BLER aumenta como resultado de una mayor variabilidad en la interferencia, pero el descarte se reduce. Este hecho indica que las prestaciones de los algoritmos están más limitadas por la accesibilidad a los recursos que por condiciones de canal.

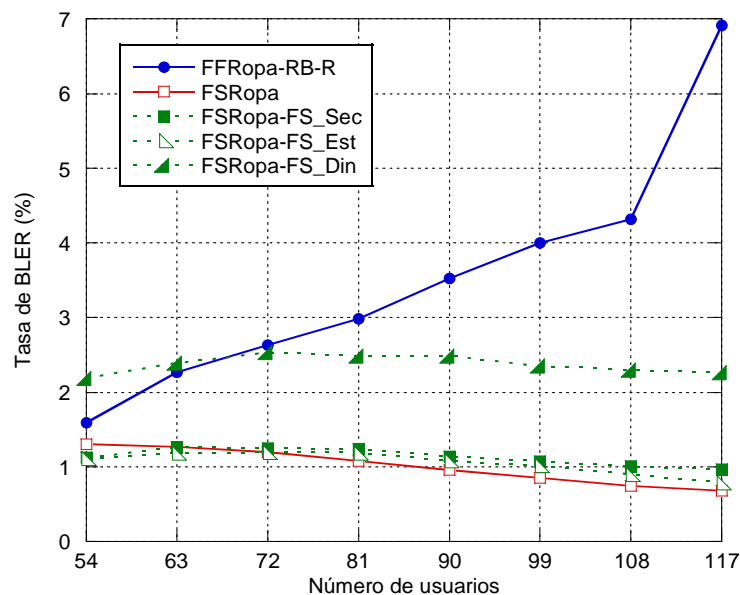


Figura 5.13: Tasa de BLER para los usuarios de frontera en FSRopa y FSRopa-FS

En la Figura 5.14 se muestran las curvas de la tasa de descarte para las distintas variantes del algoritmo FSRopa-VF. En este caso sí se aprecia una mejora del descarte para todos ellos con respecto a FFRopa-RB-R debido a un reuso más agresivo de los recursos. Si bien el tratamiento de los usuarios de frontera como interiores (FSRopa-VF) permite reducir el descarte con respecto a no aplicar ninguna coordinación sobre ellos (FFRopa-RB-R), la ganancia real se obtiene cuando los sectores pueden reutilizar RBs de la frontera opuesta (FSRopa-VF_OpFrontR) o, alternativamente, cuando se evita asignar en un

sector los RBs de la frontera más próximas de la celda vecina (FSRopa-VF_FrontProtect). Esta última restricción, aunque mejora las condiciones de interferencia de los RBs de la frontera, reduce el número de RBs asignables en cada sector, con lo que aparecen situaciones de bloqueo a medida que la carga crece. Este hecho se solventa permitiendo que los sectores asignen estos RBs protegidos en último lugar en situaciones de carga extrema (FSRopa-VF_FrontProtectR), algoritmo que ofrece el mínimo descarte de entre todos los analizados. Si se incorpora además la posibilidad de reutilizar los RBs de la frontera opuesta (FSRopa-VF_FrontProtectR_OpFrontR), se observa una degradación de las prestaciones debido a que prácticamente todos los RBs pueden ser asignados por cualquier sector. El caso se asemeja más a un esquema FFR, con lo que se incrementa el nivel de interferencia y su variabilidad. Solo cuando se aplica un esquema de asignación ortogonal de RBs entre celdas (FSRopa-VF_FrontProtectR_OpFrontR_Ort) se logra mejorar ligeramente las prestaciones porque se ofrecen unas mejores condiciones de canal, aunque el aumento del número de restricciones en la asignación de recursos deja la tasa de descarte lejos de FSRopa-VF_FrontProtectR.

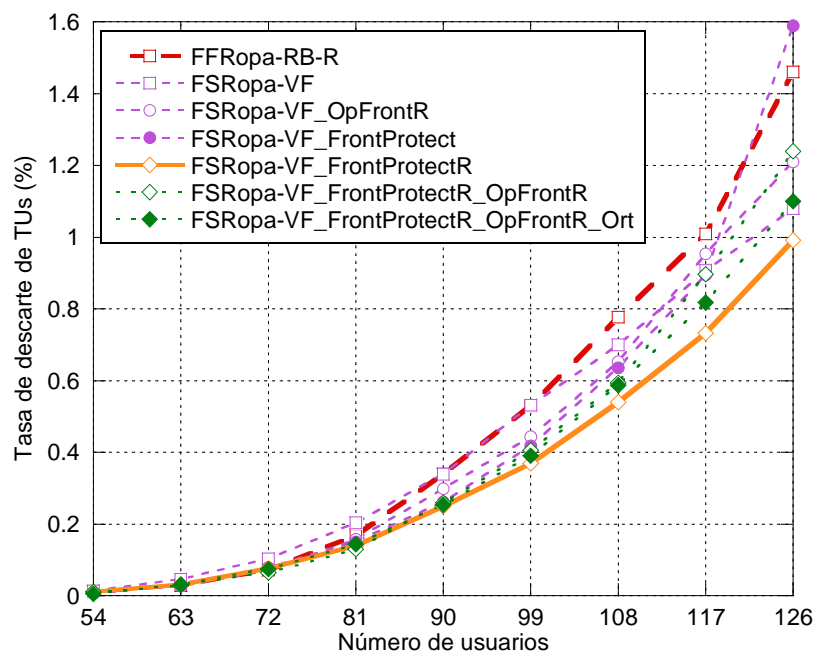


Figura 5.14: Tasa de descarte para los algoritmos FSRopa-VF

5.3 Evaluación de los algoritmos de asignación de recursos con reuso unidad (...)

Si comparamos las prestaciones ofrecidas por los algoritmos de asignación de recursos con reuso unidad a nivel de celda o de sector (Figura 5.15), podemos comprobar claramente que el reuso a nivel de sector consigue un incremento importante de la capacidad de la celda para el límite marcado del 1% del descarte. Mientras el mejor algoritmo con reuso unidad a nivel de celda (FFRopa-MCS) ofrece una capacidad de 104 usuarios activos por celda, con los mecanismos de reuso unidad a nivel de sector se obtiene una capacidad de 117 usuarios con el algoritmo FFRopa-RB-R y 126 con FSRopa-VF_FrontProtectR. En términos de ganancia en capacidad, esto se traduce en un 12,5% y 21,1% respectivamente. Si lo comparamos con los resultados de los algoritmos basados en asignación de RBs adicionales FFR-RB y FFRopa-RB, la mejora en capacidad con el algoritmo FSRopa-VF_FrontProtectR resulta del 40% y del 34%, respectivamente. Sin embargo, este incremento de capacidad está lejos del valor teórico del 133% anteriormente apuntado ya que en un sistema real no es posible obtener un reuso total de los recursos debido la interferencia intersector generada.

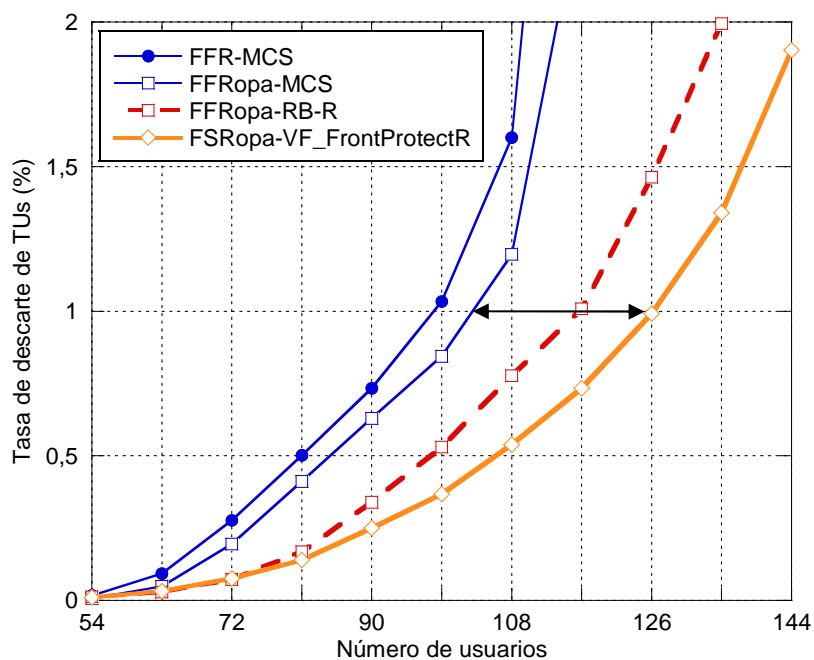


Figura 5.15: Ganancia en capacidad al aplicar reuso a nivel de sector

El algoritmo FSRopa-VF_FrontProtectR no solo proporciona una mejora en términos de capacidad de la celda, sino también en la equitatividad en la asignación de recursos. Para mostrar este aspecto, se evalúa el grado de *satisfacción de tasa* (que se define como el porcentaje de tasa transmitida satisfactoriamente con respecto a la tasa total demandada) para distintos valores de percentiles de usuarios con peores condiciones de probabilidad de descarte. En la Figura 5.16 se puede comprobar que incluso para un valor similar de tasa de descarte del 1%, FSRopa-VF_FrontProtectR (con 126 usuarios por celda) ofrece una mejor satisfacción de tasa que FFRopa-RB-R (con 117 usuarios por celda) para cualquier percentil de peores usuarios, esto es, el número de usuarios soportado es mayor, pero también lo es la equitatividad en la tasa cursada por usuario. Si comparamos para un mismo número de usuarios totales (117 usuarios por celda), se puede comprobar que el algoritmo FSRopa-VF_FrontProtectR proporciona un claro incremento en la tasa transmitida puesto que ofrece una mayor accesibilidad a los recursos radio sin que las condiciones de canal empeoren dramáticamente.

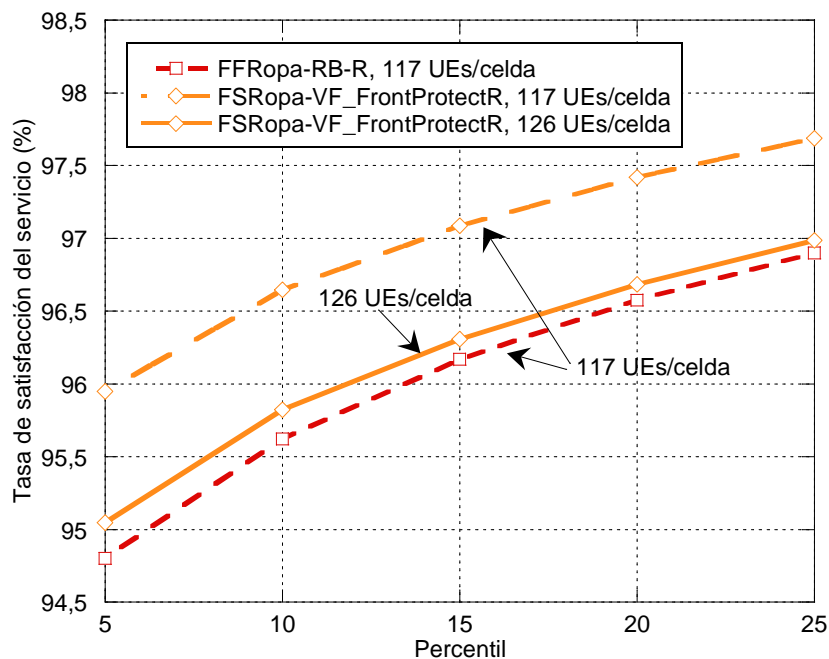


Figura 5.16: Satisfacción de tasa para algoritmos de reúso unidad a nivel de sector

Es importante destacar que la mejora en prestaciones obtenida con los algoritmos de asignación con reuso unidad a nivel de sector no supone un aumento importante de la complejidad del algoritmo ni de los terminales empleados, puesto que la precisión de la información de posición requerida para obtener buenas prestaciones es baja y básicamente se reduce a determinar si un usuario está o no en la frontera.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha explorado la mejora en prestaciones que supone aplicar un reuso unidad a nivel de sector en lugar de a nivel de celda, lo que permite asignar varias veces determinados RBs dentro de la propia celda. Este reuso sin embargo aumenta el nivel de interferencia existente en el sistema. Debido a esto, y a diferencia de lo que sucedía en el capítulo 4, la priorización del uso de MCSs elevadas frente a asignar RBs adicionales deja de ser ventajoso puesto que al tener unos mayores requisitos de SINR, es más improbable que los RBs puedan ser reutilizados en otro sector.

La aplicación directa del reuso a nivel de sector sobre un esquema FFR implica una reducción en la capacidad como resultado de la fuerte interferencia intersector existente en el sistema. Sin embargo, al aplicarlo sobre un esquema FFR_{opa} es posible lograr incrementos en la capacidad de la celda por encima del 10% gracias a la ordenación que aplica en la asignación de recursos. No obstante, los usuarios situados en la frontera entre sectores sufren una fuerte interferencia intersector y ven mermadas sus prestaciones. Para mitigar este problema se define una subbanda dedicada a los usuarios fronterizos con restricciones adicionales de reuso que permiten mejorar las condiciones de interferencia observadas por estos. De entre los esquemas analizados para la gestión de los recursos de la frontera, es FSR_{opa}-VF_FrontProtectR el que mejores prestaciones ofrece debido a que conjuga adecuadamente la protección

en términos de ICI de los usuarios de frontera con un cierto grado de reúso de los RBs de la frontera para incrementar los porcentajes de acceso. En cualquier caso, la mejora en capacidad de este algoritmo con respecto al mejor caso para reúso unidad a nivel de celda (FFRopa-MCS) es del 21%, lejos del valor teórico del 133% debido a las limitaciones resultantes de aplicar este esquema de reúso intensivo en un sistema real.

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

6.1 Conclusiones

El trabajo realizado en esta tesis, enmarcado en el contexto de la provisión de QoS en redes móviles de banda ancha, se ha centrado en la propuesta y evaluación de algoritmos de asignación de recursos radio en el enlace descendente para la gestión de la interferencia en redes basadas en tecnología OFDMA. En un contexto de redes móviles de banda ancha en las que los usuarios demandan cada vez servicios más diversos y con requisitos de QoS más heterogéneos, resulta indispensable obtener un aprovechamiento máximo de los recursos radio disponibles en el sistema. Con este fin, la mayor parte de las redes contemplan un despliegue con reuso unidad de modo que los mismos recursos son utilizados en todas las celdas del sistema. Los usuarios situados en el extremo de la celda observarán una interferencia elevada, siendo necesario aplicar técnicas de coordinación de interferencias para mejorar sus prestaciones. Al tiempo, los algoritmos de asignación de recursos radio que operan bajo las restricciones de estos esquemas de coordinación, deben tener en cuenta un buen

número de aspectos de modo que proporcionen una asignación eficiente desde un punto de vista de satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios. Aunque la tarea de scheduling puede realizarse de forma aislada, solo cuando se consideran conjuntamente la asignación de recursos radio con la provisión de QoS a los usuarios es posible obtener una gestión realmente eficiente de los recursos disponibles en la celda. Por tanto, este último planteamiento es el considerado en esta tesis para el diseño de distintas propuestas para la asignación de recursos radio tanto en escenarios con reuso unidad a nivel de celda como a nivel de sector, y que supone la contribución principal de este trabajo.

En una primera aproximación al problema, se han evaluado una serie de propuestas para la coordinación de interferencias en redes móviles OFDMA desde un punto de vista de cobertura. Tomando estos resultados, se han propuesto una serie de algoritmos de asignación de recursos (en este caso frecuencia y potencia) cuyo objetivo era garantizar una cierta calidad de señal en recepción. Aunque se trataba de un escenario limitado, estas evaluaciones han permitido obtener un buen número de conclusiones sobre distintos aspectos relativos a la asignación de recursos radio que han sido de utilidad para el diseño posterior de soluciones más robustas.

El siguiente paso ha consistido en incorporar la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios en la asignación de recursos radio de modo que se obtuvieran algoritmos completos y versátiles para la gestión de recursos radio. Partiendo de un mecanismo de reuso fraccional muy común en redes móviles OFDMA, en este trabajo se ha propuesto el esquema *FFRopa*, que permite reducir considerablemente la variabilidad de la interferencia observada por los usuarios, lo que se traduce en una mejora de sus prestaciones y de la capacidad de la celda. Además de asegurar unas buenas condiciones de canal que permitan mantener la comunicación a través del interfaz radio, el sistema debe garantizar

también el cumplimiento de los requerimientos de QoS de los usuarios de modo que su experiencia del sistema sea favorable. Para lograr este objetivo, las propuestas realizadas consideraban de forma conjunta las restricciones impuestas por los mecanismos de coordinación de ICI, la diversidad multiusuario y la satisfacción de los requisitos de QoS. Las prestaciones de estas propuestas se han analizado para diversas estrategias de scheduling temporal de entre las más comunes que pueden encontrarse en la literatura. Finalmente, el análisis se ha extendido a un escenario con reuso unidad a nivel de sector, donde se han estudiado distintas opciones para la asignación de los usuarios situados en la frontera entre sectores, de modo que se mejoren sus condiciones de interferencia y la reutilización de recursos siga siendo elevada.

Las distintas propuestas realizadas en esta tesis han sido evaluadas mediante una herramienta de simulación de sistema desarrollado en C++ para este efecto. El simulador modela todos los bloques importantes que influyen en la coordinación de interferencias y asignación de recursos en el enlace radio. Gracias a esta herramienta se han podido analizar en detalle los problemas derivados de las redes OFDMA, lo que ha facilitado el planteamiento de nuevas soluciones en este trabajo. Por otra parte, el diseño modular de la herramienta permite ampliar o sustituir de forma sencilla determinados bloques para futuras expansiones de la misma.

Las conclusiones concretas del trabajo realizado pueden desglosarse en dos bloques:

6.1.1 Coordinación de interferencias y algoritmos de asignación de recursos radio

En esta tesis se han analizado distintos esquemas de coordinación de interferencias y algoritmos de asignación de recursos asociados. Los esquemas

basados en sectorización permiten obtener unas buenas condiciones de interferencia incluso en el exterior de la celda, pero limitan la accesibilidad a los recursos. Los esquemas FFR, que es la opción que se está imponiendo en las nuevas redes de banda ancha basadas en OFDMA, ofrecen un elevado grado de libertad en la asignación de recursos pero provocan una elevada variabilidad en la interferencia intercelular, que limita las prestaciones ofrecidas en la celda. En un intento por aunar los beneficios de ambos mecanismos, en este trabajo se ha presentado el esquema de coordinación FFR_{opa}, que permite reducir la variabilidad de la interferencia por medio de un esquema de ordenación en la asignación de recursos frecuenciales. El problema de la variabilidad de la interferencia se agrava cuando se consideran esquemas de reuso unidad a nivel de sector. En este caso, es preciso aplicar nuevas medidas de coordinación de interferencias para proteger a los usuarios que se encuentran en la frontera entre sectores, que son los más susceptibles de ver degradadas sus prestaciones por esta nueva componente de interferencia. Como conclusión del análisis efectuado puede extraerse que es posible reutilizar los recursos asignados a los usuarios fronterizos, lo que permite mejorar la eficiencia del espectro, pero aplicando ciertas restricciones en cuanto a la asignación de los recursos y su reutilización por parte del sector opuesto.

Bajo este esquema de coordinación FFR_{opa} se han definido y evaluado diferentes algoritmos de asignación de recursos para una gestión eficiente de los recursos radio. Los resultados indican que aplicar demasiadas restricciones en la asignación de recursos para mejorar las condiciones de canal observadas por los usuarios acaba limitando su accesibilidad, lo que en definitiva hace aumentar la tasa de descarte de paquetes en el sistema y empeora la experiencia de usuario. A medida que la carga del sistema aumenta y los usuarios comienzan a sufrir retrasos en sus servicios, resulta más conveniente para el sistema priorizar la asignación de MCSs más eficientes si las condiciones radio lo permiten antes que asignar más recursos frecuenciales a cada usuario, ya que

de este modo es posible aumentar la tasa servida al tiempo que se conservan recursos frecuenciales como para asignar un mayor número de usuarios. Sin embargo, cuando se permite el reuso de RBs dentro de la celda, resulta más adecuado priorizar la asignación de RBs adicionales de modo que los requisitos de SINR sean más bajos y se consiga reutilizar RBs con mayor facilidad, aumentando consecuentemente la tasa cursada por el sistema. Por otra parte, en este trabajo se ha propuesto un mecanismo de asignación de potencia basado en máscaras mínimas que permite incrementar la accesibilidad a la celda frente a un esquema de asignación de potencia constante, pero manteniendo bajo control la variabilidad de la ICI debida a las asignaciones de potencia realizadas en las celdas.

6.1.2 Provisión de QoS

A lo largo de esta tesis se han analizado distintas opciones para la provisión de QoS a los usuarios asumiendo servicios limitados por retardo. En primer lugar, se ha analizado cuál es el método más adecuado para la gestión de la prioridad de asignación de cada conexión. Solo cuando el scheduling temporal se integra en la propia tarea de scheduling frecuencial es posible seguir de forma precisa el estado de los diferentes servicios y obtener así la satisfacción de la QoS demandada por los usuarios. En este sentido, la implementación utilizada pasa por marcar cada paquete con un valor de prioridad individual de acuerdo con la estrategia de scheduling temporal elegida y actualizar dicha prioridad tras cada asignación de recursos.

En este trabajo se han analizado también algunos de los enfoques de estrategias de scheduling temporal más comunes que pueden encontrarse en la literatura en un escenario con tráficos con requisitos de retardo. El resultado obtenido es que las estrategias que incorporan información del canal en la priorización de las conexiones suelen llevar a una monopolización de los

recursos por parte de los usuarios del centro de la celda, que son los que mejores condiciones de canal observan. Las mejores prestaciones se obtienen con aquellas estrategias que se centran únicamente en los parámetros de tráfico (tasa servida y retardo), siendo el scheduler frecuencial el encargado de asegurar unas condiciones de canal suficientemente buenas como para limitar el bloqueo de usuarios. En concreto, la estrategia M-LDF es la que ofrece unas mejores prestaciones globales, resultando muy eficaz en los escenarios con servicios de diferente cota de retardo, que es un caso frecuente en un sistema real, puesto que es capaz de balancear las oportunidades de asignación entre las conexiones para evitar que los paquetes alcancen su correspondiente cota máxima de retardo.

6.2 Líneas futuras de investigación

De acuerdo con el contenido de esta tesis, se plantean las siguientes líneas de investigación:

6.2.1 Algoritmos de asignación para incrementar la capacidad del sistema

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que es posible obtener un incremento de la capacidad de la celda cuando se aplican esquemas de reuso intensivo de recursos dentro de la propia celda. Sin embargo, las condiciones de interferencia empeoran como resultado de la reutilización de RBs en diferentes sectores de la celda, lo que exige el diseño de algoritmos de asignación más eficientes que tengan en cuenta los condicionantes añadidos en este nuevo modelo de despliegue.

Análogamente, otra forma de incrementar la capacidad del sistema pasa por utilizar en el despliegue estaciones relay, es decir, micro-estaciones base

desplegadas dentro de la cobertura de las estaciones base macro para cubrir huecos de cobertura o áreas de gran demanda de tráfico. Dichas estaciones utilizan el mismo ancho de banda que las estaciones macro circundantes, por lo que será preciso desarrollar esquemas de coordinación de interferencias entre ellas. Por otra parte, el backhaul de las estaciones relay se hace vía radio a través de la propia estación macro. Esto supone que parte de los recursos de la estación base serán utilizados para enviar y recibir datos de la estación relay, con lo que los recursos disponibles para la asignación de los usuarios servidos por la estación macro se reducen. Además, puesto que el ancho de banda disponible para el backhaul radio de la estación relay es limitado, el servicio ofrecido a los usuarios gestionados por la estación relay puede verse afectado. Resulta por tanto imprescindible diseñar algoritmos de scheduling coordinados que residan tanto en la estación macro como en la estación relay que tengan en cuenta estos condicionantes y permitan obtener una mejora de la capacidad del sistema garantizando la provisión de la QoS independientemente de la estación que sirva al usuario.

6.2.2 Algoritmos de control de admisión y congestión para redes OFDMA

Las simulaciones presentadas en este trabajo muestran una degradación de las prestaciones del sistema cuando la carga soportada por la celda es excesivamente alta. Por tanto, un campo de especial interés es el estudio de distintos algoritmos de control de admisión para redes de banda ancha OFDMA que rechacen el acceso de nuevos servicios en caso de que se ponga en riesgo el cumplimiento de la QoS de los usuarios presentes ya en el sistema.

Por otro lado, debido a la multiplexación estadística de los distintos servicios, se pueden producir en el sistema periodos puntuales de congestión en los que las conexiones acumulan elevados retrasos y se dificulta el cumplimiento

de la QoS de los usuarios. Para estos casos sería interesante el diseño de mecanismos de control de congestión que permitan relajar temporalmente los requisitos de QoS de las conexiones o incluso liberar los servicios menos prioritarios para de este modo mantener una cierta calidad en la provisión de servicios en estos estados transitorios de congestión.

Anexo

Publicaciones y Participación en Proyectos de I+D

A.1 Listado de publicaciones

Revistas internacionales:

GUÍO, I.; HERNÁNDEZ, A.; CHÓLIZ, J. y VALDOVINOS, A.: “Resource Allocation Strategies for Full Frequency Reuse in Tri-sectorized Multi-cell Orthogonal Frequency Division Multiple Access Systems”. *Wireless Communications and Mobile Computing*. Wiley. Pte de publicación. 2012.

HERNÁNDEZ, A.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Radio Resource Allocation for Interference Management in Mobile Broadband OFDMA Based Networks”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 10, pub. 11, pp. 1409-1430. Wiley. 2010.

2 citas de otros autores:

LE, K.N. LE y DABKE, K.P.: “Effects of Doppler Spread on Adaptive Orthogonal Frequency Division Multiplexing Channel Capacity

Employing Diversity in Multipath Environments”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 13, pub. 10. Wiley. 2013.

PIJCKE, B.; ZWINGELSTEIN-COLIN, M.; GAZALET, M.; GHARBI, M. y CORLAY, P.: “An Analytical Model for the Intercell Interference Power in the Downlink of Wireless Cellular Networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pub. 95. EURASIP. 2011.

Congresos internacionales:

GUÍO, I.; HERNÁNDEZ, Á.; CHÓLIZ, J.; MONTERO, V.; LAFUENTE, J. y VALDOVINOS, A.: “Radio Resource Management in OFDMA Systems for Strong Frequency Reuse in Sectorized Deployments”. 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS’10), pp. 641-645. York, Inglaterra. 2010.

1 cita de otros autores:

CHEN, Sh.; ZHANG, Zh.; CHEN, X.; ZHANG, H. y YUEN, Ch.: “Adaptive Bit Allocation in Rateless Coded MISO Downlink System with Limited Feedback”. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall’12)*, pp. 1-5. Ciudad de Québec, Québec, Canada. 2012.

GUÍO, I.; HERNÁNDEZ, Á.; CHÓLIZ, J.; MONTERO, V.; LAFUENTE, J. y VALDOVINOS, A.: “User Based vs. Frequency Based Resource Occupation Ordering in Packet Scheduling in OFDMA Systems”. 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS’10), pp. 441-445. York, Inglaterra. 2010.

GUÍO, I.; HERNÁNDEZ-SOLANA, Á.; CHÓLIZ, J.; MONTERO, V.; LAFUENTE-MARTÍNEZ, J. y VALDOVINOS, A.: “Channel Aware Deferring Strategies to Improve Packet Scheduling in OFDMA Systems”. IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'10), pp. 294-299. Niagara Falls, Ontario, Canadá. 2010.

HERNÁNDEZ, Á.; GUÍO, I.; MONTERO, V. y VALDOVINOS, A.: “Impact of ICI Management Schemes on Packet Scheduling Strategies in OFDMA Systems”. IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC'10), pp. 395-400. Módena, Italia. 2010.

1 cita de otros autores:

KOULAKEZIAN, A.; SOLIMAN, H.M.; TANG, T. y LEON-GARCIA, A. “Robust Traffic Assignment in Transportation Networks Using Network Criticality”. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall'12), pp. 1-5. Ciudad de Québec, Québec, Canada. 2012.

HERNÁNDEZ, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Downlink Scheduling for Intercell Interference Fluctuation Mitigation in Partial-loaded Broadband Cellular OFDMA Systems”. International Conference on Ultra-Modern Telecommunications & Workshops (ICUMT '09), pp. 1-6. San Petersburgo, Rusia. 2009.

HERNÁNDEZ, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Interference Management Through Resource Allocation in Multi-cell OFDMA Networks”. IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring'09), pp. 1-5. Barcelona, España. 2009.

Otras publicaciones no relacionadas directamente con la tesis:

LAFUENTE-MARTÍNEZ, J.; HERNÁNDEZ-SOLANA, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Inter-cell Interference Management in SC-FDMA Cellular Systems”. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring’11), pp. 1-5. Budapest, Hungría. 2011.

LAFUENTE-MARTÍNEZ, J.; HERNÁNDEZ-SOLANA, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Radio Resource Strategies for Uplink Inter-cell Interference Fluctuation Reduction in SC-FDMA Cellular Systems”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’11), pp. 185-190. Cancún, Méjico. 2011.

3 citas de otros autores:

KADDOUR, F.Z.; VIVIER, E.; PISCHELLA, M. y MARTINS, P.: “A New Method for Inter-Cell Interference Estimation in Uplink SC-FDMA Networks”. IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring’12), p.p. 1-5. Yokohama, Japón. 2012.

DIEHM, F. y FETTWEIS, G.: “Cooperative interference prediction for enhanced uplink link adaptation under backhaul delays”. IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’12), pp. 173-177. Sidney, Australia. 2012.

KOULAKEZIAN, A.; SOLIMAN, H.M.; TANG, T. y LEON-GARCIA, A. “Robust Traffic Assignment in Transportation Networks Using Network Criticality”. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall’12), pp. 1-5. Ciudad de Québec, Québec, Canada. 2012.

GÁLLEGO, J.R.; HERNÁNDEZ-SOLANA, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Performance Evaluation of Nonsynchronized Initial Random Access for

Mobile Broadband Systems”. Telecommunication Systems Journal, vol. 43 pub. 3-4, pp. 279-29. Springer. 2010.

GÁLLEGO, J.R.; HERNÁNDEZ-SOLANA, Á.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Comparative analysis of non-synchronized initial random access for mobile broadband systems”. IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring’09), pp. 1-5. Barcelona, España. 2009.

A.2 Participación en proyectos de I+D relacionados con la tesis

“Gestión de Recursos Radio en Redes Móviles Celulares de Banda Ancha OFDMA con Soporte de Servicios Multicast y Modo Relay”, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) ref. nº TEC2008-04946. 2009-2011 (Universidad de Zaragoza).

“TelMAX: Sistema de Comunicaciones Móviles Profesionales de Banda Ancha”, TELTRONIC S.A.U. (Proyecto CENIT financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio). 2007-2011 (Universidad de Zaragoza).

Bibliografía

3GPP2 TECHNICAL SPECIFICATION GROUP C: "Physical Layer for Ultra Mobile Broadband (UMB) Air Interface Specification". C.S0084-001-0, v3.0. 2008.

ABRARDO, A.; ALESSIO, A.; DETTI, P. y MORETTI, M.: "Centralized Radio Resource Allocation for OFDMA Cellular Systems". IEEE International Conference on Communications (ICC'07), pp. 5738-5743. Glasgow, Escocia. 2007.

AGGARWAL, R.; ASSAAD, M.; KOKSAL, C.E. y SCHNITER, P.; "Joint Scheduling and Resource Allocation in the OFDMA Downlink: Utility Maximization under Imperfect Channel-State Information". IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, pub. 11, pp. 5589-5604. 2011.

ALI, S.H. y LEUNG, V.C.M.: "Dynamic frequency allocation in fractional frequency reused OFDMA networks". IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, pub. 8, pp. 4286-4295. 2009.

ALSAWAH, A. y FIJALKOW, I.: "Base-Station and Subcarrier Assignment in Two-Cell OFDMA Downlink under Qos Fairness". IEEE 19th International

- Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'08), pp. 1-6. Cannes, Francia. 2008.
- AMZALLAG, D.; ARMARNIK, T.; LIVSCHITZ, M. y RAZ, D.: "Multi-Cell Slots Allocation in OFDMA System". 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, pp. 1-5. Budapest, Hungría. 2007.
- ANDREWS, M.; KUMARAN, K.; RAMANAN, K.; STOLYAR, A.; WHITING, P. y VIJAYAKUMAR, R.: "Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link", IEEE Communications Magazine, vol. 39, pub. 2, pp. 150-154. 2001.
- ANGELAKIS, V.; CHEN, L. y YUAN, D.: "A Fully Decentralized and Load-Adaptive Fractional Frequency Reuse Scheme". IEEE 19th International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'11), pp 425-428. Singapur. 2011.
- BASUKALA, R.; MOHD RAMLI, H. A. y SANDRASEGARAN, K.; "Performance Analysis of EXP/PF and M-LWDF in Downlink 3GPP LTE System". First Asian Himalayas International Conference on Internet (AH-ICI'09), pp. 1-5. Katmandú, Nepal. 2009.
- BAUM, K. L.; KOSTAS, T. A.; SARTORI, P. J.; CLASSON, B. K.: "Performance Characteristics of Cellular Systems with Different Link Adaptation Strategies". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 52, pub. 6, pp. 1497-1507. 2003.
- BEH, K. Ch.; ARMOUR, S. y DOUFEXI, A.: "Joint Time-Frequency Domain Proportional Fair Scheduler with HARQ for 3GPP LTE Systems". IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC2008-Fall), pp. 1-5. Calgary, Alberta, Canadá. 2008.

- BILIOS, D.; BOURAS, C.; KOKKINOS, V.; PAPAZOIS, A. y TSELIU G.: “Optimization of Fractional Frequency Reuse in Long Term Evolution Networks”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2012 (WCNC'12), pp 1853-1857. París, Francia. 2012.
- BOUSTANI, A.; KHORSANDI, S.; DANESFAHANI, R. y MIRMOTAHHARY, N.: “An Efficient Frequency Reuse Scheme by Cell Sectorization in OFDMA Based Wireless Networks”. Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, (ICCIT '09), pp. 800-805. Seúl, Corea del Sur. 2009.
- CASTAÑEDA, M.; IVRLAC, M.T.; NOSSEK, J.A.; VIERING, I. Y KLEIN, A.: “On Downlink Intercell Interference in a Cellular System”. IEEE 18th International Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), pp. 1-5. Atenas, Grecia. 2007.
- CHAN, G.K.: “Effects of Sectorization on the Spectrum Efficiency of Cellular Radio Systems”. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 41, pub. 3, pp. 217-225. 1992.
- CHANG, M.-K. y KUO, C.-C.J.: “Power Control, Adaptive Modulation and Subchannel Allocation for Multiuser Downlink OFDM”. Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall), pp. 764-768. Los Ángeles, California, Estados Unidos. 2004.
- CHANG, R. Y.; TAO, Z.; ZHANG, J. y KUO, C.-C.J.: “A Graph Approach to Dynamic Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multi-Cell OFDMA Networks”. IEEE International Conference on Communications (ICC'09), pp. 1-6. Dresde, Alemania. 2009.
- CHARAFEDDINE, M. y PAULRAJ, A.: “2-sector interference channel communication for sum rates and minimum rate maximization”, Proc. of

- the 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS'09), pp. 951-956. Baltimore, Maryland, Estados Unidos. 2009.
- CHEE, T. K.; LIM, Ch.-Ch. y CHOI, J.: "Sub-optimal Power Allocation for Downlink OFDMA Systems". IEEE 60th Vehicular Technology Conference, (VTC2004-Fall), vol.3, pp. 2015-2019. Los Ángeles, California, 2004.
- CHEN, J.-Ch.; LIN, H.-L. y NG, H.-F.: "Adaptive TUF Packet Scheduling Scheme for OFDMA-based WiMAX Systems". Session C5 of Taiwan Academic Network (TANET'08), pp. 469-474. Kaohsiung, Taiwan. 2008.
- CHIU, Ch. Sh.: "Combined Partial Reuse and Soft Handover in OFDMA Downlink Transmission". IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2008-Spring). Marina Bay, Singapur. 2008.
- CHIUSSI, F. M. y SIVARAMAN, V.: "Achieving High Utilization in Guaranteed Services Networks Using Early-Deadline-First Scheduling". Sixth International Workshop on Quality of Service (IWQoS'98), pp. 209-217. Napa, California, Estados Unidos. 1998.
- CHO, S.-M. y LEE, T. J.: "Fractional Frequency Reuse with Ordering to Increase Capacity of OFDM Systems". EICE Transactions on Communications, vol. E92.B, pub. 2, pp. 654-657. 2009.
- CHOI, Y.-J.; KIM, C. S. y BAHK, S.: "Flexible Design of Frequency Reuse Factor in OFDMA Cellular Networks". IEEE International Conference on Communications (ICC'06), pp. 1784-1788. Estambul, Turquía. 2006.
- DARWISH, A.; IBRAHIM, A. S.; BADAWI, A. H. y ELGEBALY, H.: "Performance Improvement of Fractional Frequency Reuse in WiMAX Network". IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, VTC2011-Spring, pp. 1-5. Yokohama, Japón. 2011.

- DASGUPTA, D.; HERNANDEZ, G.; GARRETT, D.; VEJANDLA, P. K.; KAUSHAL, A.; YERNENI, R. y SIMIEN, J.: “A Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms with Informed Initialization and Kuhn-Munkres Algorithm for the Sailor Assignment Problem”. Proceedings of the 2008 Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'08). Atlanta, Georgia, Estados Unidos. 2008.
- EDT, G.: “MobileWiMAX—Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”. WiMAX Forum. 2006.
- ELAYOUBI, S. E.; HADDADA, O. B. y FOURESTIÉ, B.: “Performance Evaluation of Frequency Planning Schemes in OFDMA-based Networks”. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, pub. 5, pp. 1623-1633. 2008.
- ENGEL, J. y PERITSKY, M.: “Statistically-Optimum Dynamic Server Assignment in Systems with Interfering Servers”. IEEE Transactions on Communications, vol. 21, pub. 11, pp. 1287-1293. 1973.
- FANG, L. y ZHANG, X.: “Optimal Fractional Frequency Reuse in OFDMA Based Wireless Networks”. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM '08), pp. 1-4. Dalian, China. 2008.
- FODOR, G. y KOUTSIMANIS, C.: “A Low Intercell Interference Variation Scheduler for OFDMA Networks”. IEEE International Conference on Communications (ICC'08), pp. 3078-3084. Pekín, China. 2008.
- FODOR, G., KOUTSIMANIS, C., RÁCZ, A., REIDER, N., SIMONSSON, A. y MÜLLER, W.: “Intercell Interference Coordination in OFDMA Networks

- and in the 3GPP Long Term Evolution System”, *Journal of Communications*, vol. 4, pub. 7, pp. 445-453. 2009.
- FOSCHINI, G.J. y MILJANIC, Z.: "A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, pub. 4, pp. 641-646. 1993.
- FRAIMIS, I.G.; PAPOUTSIS, V.D. y KOTSOPOULOS, S.A.: "A Distributed Radio Resource Allocation Algorithm with Interference Coordination for Multi-cell OFDMA Systems". *IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'10)*, pp. 1354-1359. Estambul, Turquía. 2010.
- FU, I-K. y SHEEN, W.-H.: "An Analysis on Downlink Capacity of Multi-Cell OFDMA Systems Under Randomized Inter-cell/sector Interference". *IEEE 65th Vehicular Technology Conference, VTC2007-Spring*, pp. 2736-2740. Dublín, Irlanda. 2007.
- FU, W.; TAO, Z.; ZHANG, J. y AGRAWAL, D.P.: "Differentiable Spectrum Partition for Fractional Frequency Reuse in Multi-Cell OFDMA Networks". *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'10)*, pp. 1-6. Sídney, Nueva Gales del Sur, Australia. 2010a.
- FU, W.; TAO, Z.; ZHANG, J. y AGRAWAL, D.P.: "Clustering Based Fractional Frequency Reuse and Fair Resource Allocation in Multi-Cell Networks". *IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, pp. 1-5. Ciudad del Cabo, Sudáfrica. 2010b.
- GAO, D.; ZHU, G.; LI, Y.; CHEN, Y. y WU, W.: "Performance and Frame Structure of Fractional Frequency Reuse in Multi-User Spatial Multiplexing System". *IEEE 5th International Conference on Wireless*

-
- Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom'09). pp. 1-5. Pekín, China. 2009.
- GHAFFAR, R. y KNOPP, R.: “Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks”. 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'10), pp. 273-277. Aviñón, Francia. 2010.
- GIULIANO, R.; LORETI, P.; MAZZENGA, F. y SANTELLA, G.: “Fractional Frequency Reuse Planning for WiMAX over Frequency Selective Channels”. IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '08). Creta, Grecia. 2008a.
- GIULIANO, R.; MONTI, C. Y LORETI, P.: “WiMAX Fractional Frequency Reuse for Rural Environments”. IEEE Wireless Communications, vol. 15, pub. 3, pp. 60-65. 2008b.
- GONZÁLEZ G, D.; GARCÍA-LOZANO, M.; RUIZ, S.; OLMOS, J. Y CORVINO, V.: “Performance Evaluation of Downlink Interference Coordination Techniques in LTE Networks”. IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC2010-Fall), pp. 1-5. Ottawa, Ontario, Canadá. 2010.
- GOWDA, H.; LAKSHMAIAH, R.; KAUR, M.; MOHANRAM, C.; SINGH, M. y DONGRE, S.: “A Slot Allocation Mechanism for Diverse QoS Types in OFDMA Based IEEE 802.16e Systems”. 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT'07), vol. 1, pp. 13-17. Gangwon-Do, Corea del Sur. 2007.
- GUEGUEN, C. y BAEY, S.: “A Fair Opportunistic Access Scheme for Multiuser OFDM Wireless Networks”. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009. 2009.

- GUIO, I.; HERNANDEZ-SOLANA, A.; MONTERO, V.; LAFUENTE-MARTINEZ, J. y VALDOVINOS, A.: "Channel Aware Deferring Strategies to Improve Packet Scheduling in OFDMA Systems". *IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'10)*, pp. 294-299. Niagara Falls, Ontario, Canadá. 2010.
- HAAS, Z.J.; WINTER, J.H. y JOHNSON, D.S.: "Simulation Results of the Capacity of Cellular Systems". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, pub. 4, pp. 805-817. 1997.
- HALPERN, S.W.: "Reuse Partitioning in Cellular Systems". *Proc. of the 33rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 322-327. Toronto, Ontario, Canadá. 1983.
- HAMOUDA, S.; TABBANE, S. y GODLEWSKI, Ph.: "Improved Reuse Partitioning and Power Control for Downlink Multi-Cell OFDMA Systems". *International Workshop on Broadband Wireless Access for Ubiquitous Networking (BWAN'06)*. Alguer, Italia. 2006.
- HAMOUDA, S.; YEH, C.; KIM, J.; WOORAM, S. y KWON, D.S.: "Dynamic hard fractional frequency reuse for mobile WiMAX". *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'09)*, pp. 1-6. Galveston, Tejas, Estados Unidos. 2009.
- HASSAN, N. U. y ASSAAD, M.: "Time Scheduling, Subcarrier and Power Allocation in Multi-Service Downlink OFDMA Systems". *IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, pp. 1-6. Ciudad del Cabo, Sudáfrica. 2010.
- HEO, J.; CHA, I. y CHUANG, K.: "Effective Adaptive Transmit Power Allocation Algorithm Considering Dynamic Channel Allocation in Reuse Partitioning-

- Based OFDMA System”. Springer Wireless Personal Communications, vol. 43, pub. 2, pp. 677-684. 2007.
- HERNÁNDEZ, A.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Downlink Scheduling for Inter-cell Interference Fluctuation Mitigation in Partial-loaded Broadband Cellular OFDMA Systems”. Proc. of IEEE International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT’09), pp. 1-6. San Petersburgo, Rusia. 2009.
- HERNÁNDEZ, A.; GUÍO, I. y VALDOVINOS, A.: “Radio Resource Allocation for Interference Management in Mobile Broadband OFDMA Based Networks”. Wireless Communications & Mobile Computing, vol. 10, pub. 11, pp. 1409-1430. 2010.
- HOLMA, H. y TOSKALA, A.: “LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access”. Wiley. 2009.
- HOLTZMAN, J. M.: “Asymptotic Analysis of Proportional Fair Algorithm”. 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’01), vol. 2, pp. F-33-F-37. San Diego, California, Estados Unidos. 2001.
- HOSEIN, P.: "System Capacity of a Two-Sector OFDMA Downlink with QoS Constraints". IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’09), pp. 1376-1380. Tokio, Japón. 2009.
- HUANG, J. y NIU, Z.: “Buffer-Aware and Traffic-Dependent Packet Scheduling in Wireless OFDM Networks”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’07), pp. 1554-1558. Kowloon, China. 2007.

IEEE 802.16 WORKING GROUP: "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems". IEEE 802.16-2004. 2004.

IEEE 802.16 WORKING GROUP: "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Systems; Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, and Corrigendum 1". IEEE 802.16e. 2005.

INDUMATHI, G.; VIJAYARANI, S. y MURUGESAN, K.: "User Based Resource Scheduling for Heterogeneous Traffic in the Downlink of OFDM Systems," International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN'11), pp. 569-574. Thuckalay, India. 2011.

JAKES, W. C.: "Microwave Mobile Communications". John Wiley & Sons Inc. Nueva York, Nueva York, Estados Unidos. 1975.

JALALI, A.; PADOVANI, R. y PANKAJ, R.: "Data Throughput of CDMA-HDR A High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System". IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (VTC2000-Spring), vol. 3, pp. 1854-1858. Tokio, Japón. 2000.

JANG, J. y LEE, K. B.: "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, pub. 2, pp. 171-178. 2003.

KAUSAR, R.; CHEN, Y. y CHAI, K.K.: "Adaptive Time Domain Scheduling Algorithm for OFDMA Based LTE-Advanced Networks". IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'11), pp. 476-482. Wuhan, China. 2011.

- KELIF, J.-M.; COUPECHOUX, M. y GODLEWSKI, P.: "Fluid Model of the Outage Probability in Sectored Wireless Networks". IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'08), pp. 2933-2938. Las Vegas, Nevada, Estados Unidos. 2008.
- KHAWAM, K. y KOFMAN, D.: "Opportunistic Weighted Fair Queueing". IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC2006-Fall), pp. 1-5. Montreal, Québec, Canadá. 2006.
- KIM, J. y JEON, W.S.: "Two Practical Resource Allocation Techniques for Fractional Frequency Reuse in IEEE 802.16m Networks". Proc. of the IEEE 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC'11), pp. 261-265. Estambul, Turquía. 2011.
- KIM, K.T. y OH, S.K.: "A Universal Frequency Reuse System in a Mobile Cellular Environment". IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring), pp. 2855-2859. Dublín, Irlanda. 2007.
- KIM M.-S.; JEONG, M.R.; WATANABE, F. y TOBAGI, F.: "Band-Distributed Channel-Aware Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems". IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC2009-Spring), pp. 1-5. Anchorage, Alaska, Estados Unidos. 2009.
- KIVANC, D.; LI, G. y LIU, H.: "Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA". IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 2, pub. 6, pp. 1150-1158. 2003.
- KOLEHMAINEN, N.; PUTTONEN, J.; KELA, P.; RISTANIEMI, T.; HENTTONEN, T. y MOISIO, M.: "Channel Quality Indication Reporting Schemes for UTRAN Long Term Evolution Downlink", IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC2008-Spring), pp. 2522-2526. Marina Bay, Singapur. 2008.

KONG, Zh.; KWOK, Y.-K. y WANG, J.: “A Low-Complexity QoS-Aware Proportional Fair Multicarrier Scheduling Algorithm for OFDM Systems” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, pub. 5, pp. 2225-2235. 2009.

KOREAN TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY ASSOCIATION: “TTAS.KO-06.0064R1: Specifications for 2.3GHz Band Portable Internet Service – Physical Layer”. 2004.

KRASNIQI, B.; WRULICH, M. y MECKLENBRAUKER, C.F.: “Network-load dependent Partial Frequency Reuse for LTE”. 9th International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT'09), pp. 672-676. Icheon, Corea del Sur. 2009.

KRONGOLD, B. S.; RAMCHANDRAN, K. y JONES, D. L.: “Computational Efficient Optimal Power Allocation Algorithms for Multicarrier Communication Systems”. IEEE Transactions on Communications, vol. 48, pub. 1, pp. 23-27. 2000.

KUHN, H. W.: “The Hungarian Method for the Assignment Problem”. Naval Research Logistics. Quarterly 2, pp. 83–97. 1955.

LEE, J.; KIM, K. y LIM, Y.: “Inter-sector Interference Mitigation Method in Triple-Sectored OFDMA Systems”. Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, n° 4097, pp. 133-143. 2006.

LEI, C. y DI, Y.: “Generalized Frequency Reuse Schemes for OFDMA Networks: Optimization and Comparison”. IEEE 71st Vehicular Technology Conference, (VTC2010-Spring), pp. 1-5. Taipei, Taiwán. 2010.

LEI, H.; ZHANG, L., ZHANG, X. y YANG, D.: "A Novel Multi-cell OFDMA System Structure Using Fractional Frequency Reuse". IEEE 18th

- International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), pp. 1-5. Atenas, Grecia. 2007.
- LEI, L. y LIN, Ch.: "Scheduling Gain Analysis of Opportunistic OFDMA and OFDM-TDMA Systems". IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'08), pp. 1-5. Cannes, Francia. 2008.
- LI, G. y LIU, H.: "Dynamic resource allocation with finite buffer constraint in broadband OFDMA networks". IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC'03), vol.2, pp. 1037-1042. Nueva Orleans, Luisiana, Estados Unidos. 2003.
- LI, L.; LIANG, D.; WANG, W.: "A Novel Semi-Dynamic Inter-Cell Interference Coordination Scheme Based on User Grouping". IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC2009-Spring), pp. 1-5. Anchorage, Alaska, Estados Unidos. 2009.
- LIU, L.; ZHU, G. y WU, D.: "Interference Management Based on Enhanced Fractional Frequency Reuse in OFDMA Networks ". IEEE 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'11), pp. 1-4. Wuhan, China. 2011.
- LV, G.; ZHU, S. y HUI, H.: "A Distributed Power Allocation Algorithm with Inter-Cell Interference Coordination for Multi-Cell OFDMA Systems". IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09), pp. 1-6. Honolulu, Hawaii, Estados Unidos. 2009.
- MACDONALD, V.H.: "The Cellular Concept". Bell System Technology Journal, vol. 58, pp.15-42. 1992.

- MAO, X.; MAAREF A. y TEO, K.: "Adaptive Soft Frequency Reuse for Inter-Cell Interference Coordination in SC-FDMA Based 3GPP LTE Uplinks," IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'08), pp. 1–6. Nueva Orleans, Luisiana, Estados Unidos. 2008.
- MOHANRAM, C. y BHASHYAM, S.: "Joint Subcarrier and Power Allocation in Channel-Aware Queue-Aware Scheduling for Multiuser OFDM". IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, pub. 9, pp. 3208-3213. 2007.
- NECKER, M.C.: "Local Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks". IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Fall), pp. 1741-1746. Baltimore, Maryland, Estados Unidos. 2007a.
- NECKER, M.C.: "Coordinated Fractional Frequency Reuse". Proc. of the 10th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2007). Creta, Grecia, 2007b.
- NONCHEV, S.; VALKAMA, M. y HAMILA, R.: "Effect of High-Velocity Scenarios on the Performance of MIMO LTE Packet Scheduling," 8th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD'11), pp. 1-6. Susa, Túnez. 2011.
- NOVLAN, T.; ANDREWS, J.; SOHN, I.; GANTI, R. y GHOSH, A.: "Comparison of fractional frequency reuse approaches in the OFDMA cellular downlink". IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'10), pp. 1-5. Miami, Florida, Estados Unidos. 2010.
- OFUJI, Y.; ABETA, S. y SAWAHASHI, M.: "Unified Packet Scheduling Method Considering Delay Requirement in Forward Link Broadband Wireless

- Access". IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC2003-Fall), vol. 3, pp. 1603-1607. Orlando, Florida, Estados Unidos. 2003.
- OPPENHEIM, A.V.; SHAFER, R.W. y BUCK, J.R.: "Discrete-Time Signal Processing". Prentice Hall, 2^a ed. Upper Saddle River, Nueva Jersey, Estados Unidos. 1989.
- PEDERSEN, K.I.; MONGHAL, G.; KOVACS, I.Z.; KOLDING, T.E.; POKHARIYAL, A.; FREDERIKSEN, F. y MOGENSEN, P.: "Frequency Domain Scheduling for OFDMA with Limited and Noisy Channel Feedback". IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Fall), pp. 1792-1796. Baltimore, Maryland, Estados Unidos. 2007.
- PFLETSCHINGER, S.: "From Cell Capacity to Subcarrier Allocation in Multi-User OFDM", IST Mobile & Wireless Communications Summit, pp. 187-196. Dresde, Alemania. 2005.
- PIETRZYK, S. y JANSSEN, G. J. M.: "Multiuser Subcarrier Allocation for QoS Provision in the OFDMA Systems". IEEE 56th Vehicular Technology Conference (VTC2002-Fall), vol. 2, pp. 1077-1081. Vancouver, British Columbia, Canadá. 2002.
- PING, L.; LIU, L. y LEUNG, W. K.: "A Simple Approach to Near-Optimal Multiuser Detection: Interleave-Division Multiple-Access". IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC'03), vol. 1, pp. 391-396. Nueva Orleans, Luisiana, Estados Unidos. 2003.
- PLASS, S.: "Investigations on Link-Level Inter-Cell Interference in OFDMA Systems". Symposium on Communications and Vehicular Technology, pp 49-52. Lieja, Bélgica. 2006.

- POKHARIYAL, A.; PEDERSEN, K.I.; MONGHAL, G.; KOVACS, I. Z.; ROSA, C.; KOLDING, T.E. y MOGENSEN, P.E.: "HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution". IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring), pp. 2761-2765. Dublín, Irlanda. 2007.
- PORJAZOSKI, M. y POPOVSKI, B.: "Contribution to analysis of Intercell interference coordination in LTE: A fractional frequency reuse case". Global Mobile Congress (GMC'10), pp. 1-4. Shanghai, China. 2010.
- QIAN, M.; HARDJAWANA, W.; LI, Y.; VUCETIC, B.; SHI, J. y YANG, X.: "Inter-cell Interference Coordination through Adaptive Soft Frequency Reuse in LTE Networks". IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'06), pp 1618-1623. Las Vegas, Nevada, Estados Unidos. 2006.
- R1-050368: "Views on OFDM Parameter Set for Evolved UTRA Downlink". 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 41. Atenas, Grecia. 2005.
- R1-050589: "Pilot Channel and Scrambling Code in Evolved UTRA Downlink". 3GPP TSG RAN WG1 Reunión ad-hoc LTE. Sophia Antípolis, Francia. 2005.
- R1-050738: "Interference mitigation – Considerations and Results on Frequency Reuse". 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 42. Londres, Inglaterra. 2005.
- R1-050764: "Inter-cell Interference Handling for E-UTRA". 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 42. Londres, Inglaterra. 2005.
- R1-050833: "Interference Mitigation in Evolved UTRA/UTRAN". 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 42. Londres, Inglaterra. 2005.

- R1-051042: “System Level Performance Comparison between Frequency-Scheduled and Time-Frequency Diversity Transmission”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 42bis. San Diego, California, Estados Unidos. 2005.
- R1-051059: “Inter-Cell Interference Mitigation for EUTRA”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 42bis. San Diego, California, Estados Unidos. 2005.
- R1-051341: “Flexible Fractional Frequency Reuse Approach”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 43. Seúl, Corea del Sur. 2005.
- R1-060415: “Requirements of Downlink Inter-cell Interference Detection/Subtraction and TP”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 44. Denver, Colorado, Estados Unidos. 2006.
- R1-062712: “Scrambling Code in E-UTRA Downlink”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 46bis. Seúl, Corea del Sur. 2006.
- R1-063107: “LTE-B parameters for the Dedicated Broadcast Carrier”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 47. Riga, Letonia. 2006.
- R1-070284: “Fractional Time Re-Use Interference Co-Ordination in E-UTRA Downlink”. 3GPP TSG RAN WG1 Reunión 47bis. Sorrento, Italia. 2007.
- RAHMAN, M. y YANIKOMEROGLU H.: “Enhancing Cell-edge Performance: A Downlink Dynamic Interference Avoidance Scheme with Inter-cell Coordination”. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, pub. 4, pp. 1414-1425. 2010.
- RAMACHANDRAN, V.; KAMBLE, V. y KALYANASUNDARAM, S.: “Frequency Selective OFDMA Scheduler with Limited Feedback”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’08), pp. 1604-1609. Las Vegas, Nevada, Estados Unidos. 2008.

- RAMAMURTHI, B.: "Cutting Edge at the Cell Edge: Co-channel Interference Mitigation in Emerging Broadband Wireless Systems". Proc. of the First International Communication Systems and Networks and Workshops (COMSNETS'09). Bangalore, India. 2009.
- RHEE, J.-H.; HOLTZMAN, J. M. y KIM, D.-K.: "Performance Analysis of the Adaptive EXP/PF Channel Scheduler in an AMC/TDM System". IEEE Communications Letters, vol. 8, pub. 8, pp. 497-499. 2004.
- RHEE, W. y CIOFFI, J. M.: "Increase In Capacity of Multiuser OFDM Systems Using Dynamic Subchannel Allocation". IEEE 51st Vehicular Technology Conference (VTC2000-Spring), vol. 2, pp. 1085-1089. Tokio, Japón. 2000.
- RIEDEL, I.; ROST, P.; MARSCH, P. y FETTWEIS, G.: "Creating Desirable Interference by Optimized Sectorization in Cellular Systems". IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'10), pp. 1-5. Miami, Florida, Estados Unidos, 2010.
- RYU, S.; RYU, B.; SEO, H. y SHIN, M.: "Urgency and Efficiency Based Packet Scheduling Algorithm for OFDMA Wireless System". IEEE International Conference on Communications (ICC'05), vol. 4, pp. 2779-2785. Seúl, Corea del Sur. 2005a.
- RYU, S.; RYU, B.; SEO, H.; SHIN, M. y PARK, S.: "Wireless Packet Scheduling Algorithm for OFDMA System Based on Time-Utility and Channel State". ETRI Journal, vol. 27, pub. 6, pp. 777-787. 2005b.
- SARPERI, L.; HUNUKUMBURE, M. y VADGAMA, S.: "Simulation Study of Fractional Frequency Reuse in WiMAX Networks". Fujitsu Scientific and Technical Journal, vol. 44, pub. 3, pp. 318-324. 2008.

- SCHWARZ, S.; MEHLFUHRER, C. y RUPP, M.: “Low Complexity Approximate Maximum Throughput Scheduling for LTE”. Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR’10), pp. 1563-1569. Pacific Grove, California, Estados Unidos. 2010.
- SEZGINER, S. y SARI, H.: “Full Frequency Reuse in OFDMA-Based Wireless Networks with Sectorized Cells”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’09). Budapest, Hungría. 2009.
- SHARIAT, M.; QUDDUS, A. U. y TAFAZOLLI, R.: “On the Efficiency of Interference Coordination Schemes in Emerging Cellular Wireless Networks”. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’08). Cannes, Francia. 2006.
- SHEN, Z.; ANDREWS, J. G. y EVANS, B. L.: “Optimal Power Allocation in Multiuser OFDM Systems”. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’03), pp. 337-341. San Francisco, California, Estados Unidos, 2003.
- SHEN, Z.; ANDREWS, J. G. y EVANS, B. L.: “Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems with Proportional Rate Constraints”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, pub. 6, pp. 2726-2737. 2005.
- SHUKRY, S.M.; ELSAYED, K.; ELMOGHAZY, A. y NASSAR, A.: “Adaptive Fractional Frequency Reuse (AFFR) scheme for multi-cell IEEE 802.16e systems”. 6th International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET’09), pp. 96-102. Alejandría, Egipto. 2009.

- STERNAD, M.; OTTOSSON, T.; AHLEN, A. y SVENSSON, A.: "Attaining Both Coverage and High Spectral Efficiency with Adaptive OFDM Downlinks". IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC2003-Fall), pp. 2486-2490. Orlando, Florida, Estados Unidos. 2003.
- STOLYAR, A.L. y VISWANATHAN, H., "Self-Organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse for Best-Effort Traffic through Distributed Inter-Cell Coordination". IEEE INFOCOM'09, pp. 1287-1295. Río de Janeiro, Brasil. 2009.
- STÜBER, G. L., "Principles of Mobile Communications". Kluwer, 2^a edición. Boston, Massachusetts, Estados Unidos. 2001.
- SUN, F.; YOU, M. y LI, V.: "Dynamic Subcarrier Allocation for Real-Time Traffic over Multiuser OFDM Systems". EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009. 2009.
- TAKETSUGU, J.; YAMADA, N. y HARA, S.: "Comparison between Random Frame Error and SINR-Based Transmission Power Control in DS-CDMA Cellular System from the Viewpoint of TCP Performance". IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall), vol. 6, pp. 4427-4431. Los Ángeles, California, Estados Unidos. 2004.
- TARANETZ, M.; IKUNO, J.C. y RUPP, M.: "Capacity Density Optimization by Fractional Frequency Partitioning". Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR'11), pp. 1398-1402. Pacific Grove, California, Estados Unidos. 2011.
- TR36.104: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception". 3GPP Technical Specification Group R4, TR36.104, v8.9.0. 2010.

- TR36.942: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios”. 3GPP Technical Specification Group R4, TR36.942, v8.3.0. 2010.
- TS36.211: “Physical Channels and Modulation (Release 8)”. 3GPP Technical Specification Group R1, TS36.211, v8.9.0. 2009.
- TS36.213: “Physical Layer Procedures (Release 8)”. 3GPP Technical Specification Group R1, TS36.211, v8.8.0. 2009.
- TS36.300: “Overall description; Stage 2 (Release 8)”. 3GPP Technical Specification Group R2, TS36.300, v8.12.0. 2010.
- TS36.321: “Medium Access Control (MAC) Protocol Specification (Release 8)”. 3GPP Technical Specification Group R2, TS36.321, v8.12.0. 2012.
- WANG, H. y LILLEBERG, J.: “Conventional and Scrambling OFDM System Switch in Multi-cell Environments”. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol. 1, pp. 1-5. 2006.
- WANG, M. M.; JI, T.; BORRAN, J. y RICHARDSON, T.: “Interference Management and Handoff Techniques in Ultra Mobile Broadband Communication Systems”. IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'08), pp.166-172. Bolonia, Italia. 2008.
- WONG, C. Y.; CHENG, R. S.; LETAIEF, K. B. y MURCH, R. D.: “Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, pub. 10, pp. 1747-1757. 1999a.
- WONG, Ch. Y.; TSUI, C.-Y.; CHENG, R. S. y LETAIEF, K. B.: “A Real-Time Sub-Carrier Allocation Scheme for Multiple Access Downlink OFDM

- Transmission". IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC1999-Fall), vol. 2, pp. 1124-1128. 1999b.
- WU, J.; MEHTA, N. B. Y ZHANG, J.: "Spectral efficiency analysis of cellular systems with channel-aware schedulers". IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05), vol. 3. St. Louis, Missouri, Estados Unidos. 2005.
- WU, W. y SAKURAI, T.: "Capacity of reuse partitioning schemes for OFDMA wireless data networks". Proc. of the IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'09), pp. 13-16. Tokio, Japón. 2009.
- XIANG, X.; LIU, F. y JI, Y.: "Simulation Based Performance Evaluation of ICI Mitigation Schemes for Broadband Wireless Access Networks". Proc. of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS'08), pp. 181-187. Ottawa, Ontario, Canadá. 2009.
- XIANG, Y.; LUO, J. y HARTMANN, C.: "Inter-cell Interference Mitigation through Flexible Resource Reuse in OFDMA based Communication Networks", Proc. of the 13th European Wireless Conference (EW'07), París, Francia. 2007.
- XIE, Z. y WALKE, B.: "Enhanced Fractional Frequency Reuse to Increase Capacity of OFDMA Systems". 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'09), pp. 1-5. El Cairo, Egipto. 2009.
- XU, F.: "Fractional Frequency Reuse (FFR) and FFR-Based Scheduling in OFDMA Systems". International Conference on Multimedia Technology (ICMT'10), pp. 1-4. Ningbo, China. 2010.

- XU, L.; YAMAMOTO, K.; MURATA, H. y YOSHIDA, S.: "Adaptive Base Station Cooperation and Subchannel Reallocation at Cell Edge in Cellular Networks with Fractional Frequency Reuse". IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'09). Tokio, Japón. 2009.
- YOON, S.; CHO Y.; CHAE, Ch.-B. y LEE, H.-W.: "System Level Performance of OFDMA Forward Link With Proportional Fair Scheduling". 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'04), vol. 2, pp. 1384-1388. Barcelona, España. 2004.
- ZHANG, D.; XU, Y. y CAI, Y.: "A High Efficiency Algorithm of Power and Bit Allocation for OFDMA Systems". International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom'07), pp. 85-88. . Shanghai, China. 2007.
- ZHANG, X. y WANG, W.: "Multiuser Frequency-Time Domain Radio Resource Allocation in Downlink OFDM Systems: Capacity Analysis and Scheduling Methods". Computers and Electrical Engineering, vol. 32, pub. 1-3, pp. 118-134. 2006.
- ZHOU, Y. y ZEIN, N.: "Simulation Study of Fractional Frequency Reuse for Mobile WiMAX". IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC2008-Spring), pp. 2592-2595. Marina Bay, Singapur. 2008.
- ZHU, R.; ZHANG, X. y WANG, W.: "Scheduling Based Controllable Interference Coordination in OFDMA Systems". First International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom'06), pp. 1-5. Pekín, China. 2006.