

Miguel Eguizabal Alonso

Gestión de Recursos Radio en
Sistemas Móviles Avanzados de
Banda Ancha con Soluciones de
Extensión de Cobertura y
Capacidad Basados en
Despliegues de Red Heterogénea

Director/es

Hernández Solana, Ángela

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

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

GESTIÓN DE RECURSOS RADIO EN SISTEMAS
MÓVILES AVANZADOS DE BANDA ANCHA CON
SOLUCIONES DE EXTENSIÓN DE COBERTURA Y
CAPACIDAD BASADOS EN DESPLIEGUES DE RED
HETEROGÉNEA

Autor

Miguel Eguizabal Alonso

Director/es

Hernández Solana, Ángela

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

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

2020

Tesis doctoral

**Gestión de Recursos Radio en Sistemas Móviles
Avanzados de Banda Ancha con Soluciones de
Extensión de Cobertura y Capacidad Basados en
Despliegues de Red Heterogénea**

Autor:

Miguel Eguizábal Alonso

Directora:

Dra. Ángela Hernández Solana

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

Universidad de Zaragoza

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones



**Universidad
Zaragoza**

2020

Agradecimientos

A mi directora Ángela, por su paciencia e inestimable ayuda durante todo este largo camino.

A Noelia, por tener la suerte de tenerla a mi lado, y por su apoyo y confianza incondicional, especialmente en los momentos difíciles.

A mis amigos, por crecer juntos y por vuestra confianza ciega en mí.

A mis padres y mi hermano, por los esfuerzos realizados y la ayuda para llegar hasta aquí.

A mis compañeros del laboratorio 2.05, por hacer que mi etapa en la Universidad fuera tan agradable y enriquecedora.

Gracias a todos, no lo hubiese logrado sin vosotros.

Tabla de Contenidos

Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas.....	xv
Lista de Acrónimos.....	xix
1 - Introducción.....	1
1.1 Motivación y objetivos.....	1
1.2 Estructura de la tesis.....	6
2 - Gestión de la Interferencia en Redes Macrocelulares Homogéneas9	
2.1 Tecnología OFDMA para redes LTE.....	10
2.2 Mecanismos de control de la ICI en redes macrocelulares homogéneas..	12
2.3 Gestión de recursos radio a nivel de macrocelda	16
2.3.1 FFR with frequency occupation ordering and power adaptation (FFRopa) ..	18
3 - Despliegues Heterogéneos con Picoceldas: Gestión de Interferencias y Criterio de Selección de Nodo	23
3.1 Estado del Arte	26
3.1.1 Gestión de interferencias en despliegues heterogéneos con picoceldas	27
3.1.2 Criterio de selección de nodo para despliegues heterogéneos.....	33
3.2 Modelo del sistema.....	38
3.3 Esquemas de ICIC y criterio de selección de nodo propuestos.....	39
3.3.1 Esquemas de ICIC para despliegues de picoceldas	40
3.3.2 Criterio de selección de nodo	44

3.4 Condiciones de evaluación.....	44
3.4.1 Modelado del nivel físico y de enlace	47
3.4.2 Modelado del canal radio	49
3.4.3 Modelado de los procedimientos de monitorización del canal.....	52
3.4.4 Modelado de conexiones	53
3.4.5 Máscaras de potencia.....	55
3.4.6 Scheduling temporal.....	55
3.4.7 Scheduling frecuencial	56
3.4.8 Patrón de movimiento de los usuarios.....	57
3.4.9 Parámetros de simulación.....	57
3.5 Resultados numéricos.....	61
3.6 Conclusiones	74
4 - Despliegues Heterogéneos con Relays: Esquemas Estáticos de ICIC	77
4.1 Estado del Arte	82
4.2 Modelo del sistema con despliegue de relays.....	89
4.3 Esquemas preliminares de ICIC y RA.....	90
4.3.1 Esquemas PFX	90
4.3.2 Esquemas basados en SFR inspirados en propuestas de la literatura: SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2.....	93
4.3.3 Resultados	96
4.4 Esquemas propuestos de ICIC y RA	111
4.4.1 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: FFR_2GrRBs.....	112
4.4.2 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: SFR_2GrRBs.....	116
4.4.3 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector y reúso de RBs en RNs vecinos: FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs.....	121
4.4.4 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs.....	123
4.4.5 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: FFR_2GrRBs, FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs.....	126

4.4.6 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: SFR_2GrRBs, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs.....	130
4.4.7 Resultados	134
4.5 Esquemas propuestos de ICIC y RA basados en una estructura de combinación de tramas entre RNs.....	165
4.5.1 Estructura de combinación de tramas.....	165
4.5.2 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs...	167
4.5.3 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, rotando el patrón temporal, y considerando el despliegue de 2 RNs por sector: CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs.....	173
4.5.4 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs...	179
4.5.5 Resultados	187
4.6 Conclusiones	206
5 - Despliegues Heterogéneos con Relays: Asignación Dinámica de Recursos y Criterio de Selección de Nodo.....	209
5.1 Estado del arte	210
5.2 Modelo del sistema con despliegue de relays.....	232
5.3 Esquema dinámico de RA-ICIC y criterio de selección de nodo	235
5.3.1 Convenio de símbolos	236
5.3.2 Esquema dinámico de RA-ICIC.....	238
5.3.3 Criterio de selección de nodo	248
5.4 Resultados	262
5.4.1 Condiciones de evaluación.....	262
5.4.2 Evaluación de prestaciones del esquema dinámico de RA-ICIC.....	267
5.4.3 Evaluación de prestaciones del criterio de selección de nodo	275
5.5 Conclusiones	287
6 - Estrategias de Control de Admisión para Redes Macrocelulares	291
6.1 Estado del arte	293
6.2 Enfoque general de las propuestas de CAC	303

6.2.1 Modelo del sistema y convenio de símbolos	304
6.3 Estimación de la demanda y de los recursos consumidos en la celda	307
6.3.1 Estimación de la demanda del servicio.....	307
6.3.2 Estimación teórica ideal del consumo en la celda	308
6.3.3 Estimación teórica del consumo considerando la subbanda de recursos a la que accedería cada usuario	309
6.3.4 Estimación del consumo basada en medidas.....	311
6.3.5 Estimación del consumo ponderando las medidas con un factor corrector .	313
6.4 Estrategias de CAC con partición completa de recursos.....	314
6.4.1 Estrategia con partición completa de recursos, basada en una estimación teórica de los recursos consumidos (CP_teo)	315
6.4.2 Estrategia con partición completa de recursos, basada en medidas reales del consumo de recursos (CP_med)	316
6.5 Estrategias de CAC con reparto completo de recursos.....	317
6.6 Resultados de las estrategias de CAC preliminares	320
6.6.1 Condiciones de evaluación.....	321
6.6.2 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico ON-OFF con restricciones de retardo.....	327
6.7 Estrategias avanzadas de CAC con reparto completo de recursos	338
6.7.1 Estrategia con reparto completo de recursos, basada en medidas reales del consumo y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_ep)	338
6.7.2 Estrategia con reparto completo de recursos, ponderando las medidas reales del consumo con un factor corrector y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_pon_ep).....	339
6.7.3 Estrategia con reparto completo de recursos, ponderando las medidas reales del consumo con un factor corrector y ajustando adaptativamente el margen de recursos (CS_med_pon_ep_adap)	342
6.8 Resultados de las estrategias avanzadas de CAC	344
6.8.1 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico ON-OFF con restricciones de retardo.....	345
6.8.2 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico de video	354
6.9 Conclusiones	362

7 - Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación	365
7.1 Conclusiones	365
7.1.1 Coordinación de interferencias y selección de nodo en despliegues heterogéneos	367
7.1.2 Control de admisión en redes macrocelulares	370
7.2 Líneas futuras de investigación	371
7.2.1 Criterio de selección de nodo y reparto dinámico de recursos para despliegues heterogéneos con picoceldas.....	371
7.2.2 Estrategias de control de admisión para diferentes tipos de tráfico simultáneos	372
7.2.3 Estrategias de control de admisión para despliegues heterogéneos.....	372
Anexo – Publicaciones y Participación en Proyectos de I+D	375
A.1 Listado de publicaciones	375
A.2 Participación en proyectos de I+D relacionados con la tesis.....	377
Bibliografía	379

Lista de Figuras

Figura 2.1: Espectro de la señal OFDM	10
Figura 2.2: Estructura de trama LTE.....	11
Figura 2.3: Ejemplo del mapa tiempo-frecuencia en una comunicación OFDMA	12
Figura 2.4: Principales esquemas FFR	15
Figura 2.5: Asignación ordenada de RBs en la subbanda interior (FFRopa)	19
Figura 2.6: Asignación de recursos del esquema FFRopa	20
Figura 2.7: Asignación adaptativa de potencia (FFRopa)	21
Figura 3.1: Escenarios interferentes en el enlace descendente	24
Figura 3.2: Propuesta de ICIC basada en FFR para despliegues heterogéneos con picoceldas	31
Figura 3.3: Criterio de selección de nodo CRE.....	34
Figura 3.4: Propuestas de reparto de recursos frecuenciales entre ambas capas	35
Figura 3.5: Configuraciones más comunes para el despliegue de sectores	38
Figura 3.6: Configuración de despliegue de picoceldas	39
Figura 3.7: Esquemas de coordinación de interferencias FFRopa_xRBs	42
Figura 3.8: Ejemplo de la técnica wrap-around.....	45
Figura 3.9: División del área de cobertura de la celda por zonas.....	45
Figura 3.10: Distribución equivalente del entramado de la comunicación	46
Figura 3.11: Transmisión explícita de la interferencia	49
Figura 3.12: Esquema de envío de CQIs	52

Figura 3.13: Distribución de UEs.....	60
Figura 3.14: Posiciones de despliegue de los PeNBs	61
Figura 3.15: Porcentaje de TUs descartados para los esquemas FFRopa_xRBs ($d = 400$ m y $\theta = 30^\circ$)	63
Figura 3.16: Comparativa entre los esquemas FFRopa y FFR ($d = 400$ m y $\theta = 30^\circ$).....	65
Figura 3.17: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 87$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)	68
Figura 3.18: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 87$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)	69
Figura 3.19: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 117$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)	71
Figura 3.20: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 117$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)	72
Figura 4.1: Enlaces presentes en los despliegues heterogéneos con RNs	78
Figura 4.2: Estructura de trama. Ejemplo de reparto y reúso de recursos entre RNs y enlaces	80
Figura 4.3: Esquemas FFR y SFR, junto con varias configuraciones de despliegue de RNs.....	82
Figura 4.4: Esquemas de RA para las subtramas de acceso con diferentes factores de reúso frecuencial	84
Figura 4.5: Esquemas de RA para las subtramas de acceso para las configuraciones 2 y 3	85
Figura 4.6: Esquema de RA para la subtrama de acceso basado en SFR (configuración 1).....	88
Figura 4.7: Configuraciones de despliegue de relays.....	89
Figura 4.8: Estructura de Trama.....	90
Figura 4.9: Distribución de los recursos frecuenciales en grupos (GrRB).....	90
Figura 4.10: Esquemas PFX de RA (2 RNs por sector).....	91
Figura 4.11: RA para DeNBs (a rayas) y RNs (sólido) en subtramas de acceso (2 RNs por sector)	94
Figura 4.12: Ordenación en la asignación de recursos para los DeNBs, con asignaciones prioritarias entre sectores	94

Figura 4.13: CDF de la SINR observada por los UEs en cada zona (esquemas PFX).....	105
Figura 4.14: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas SFR_bm_opx)	109
Figura 4.15: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas preliminares más relevantes	111
Figura 4.16: RA del esquema FFR_2GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)	113
Figura 4.17: RA del esquema Back_op3 para DeNBs en subtramas backhaul (2 RNs por sector)	115
Figura 4.18: RA del esquema SFR_2GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)	117
Figura 4.19: RA para DeNBs en subtramas backhaul: Back_op4 y Back_op5 (2 RNs por sector)	119
Figura 4.20: RA de los esquemas FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector).....	122
Figura 4.21: RA de los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector).....	124
Figura 4.22: RA de los esquemas FFR_2GrRBs, FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (4 RNs por sector)	127
Figura 4.23: RA del esquema Back_op3 para DeNBs en subtramas backhaul (4 RNs por sector)	129
Figura 4.24: RA de los esquemas SFR_2GrRBs, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (4 RNs por sector)	131
Figura 4.25: RA del esquema Back_op4 para DeNBs en subtramas backhaul (4 RNs por sector)	133
Figura 4.26: CDF del throughput recibido por los mUEs y rUEs (esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs)	140
Figura 4.27: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas FFR_2GrRBs-Back_op3(4 RBs) y SFR_2GrRBs-Back_op4(5 RBs)).....	142
Figura 4.28: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema FFR_3GrRBs-Back_op3(5 RBs) cuando se aplica un bias al criterio de selección de nodo	147

Figura 4.29: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas basados en FFR y SFR, cuando se aplica un bias de 4dB)	150
Figura 4.30: CDF del throughput recibido por los UEs para la red macrocelular convencional y para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), desplegando los RNs a 2/3 del radio de la celda ($d = 2/3 \cdot R$) y en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)	153
Figura 4.31: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector)	157
Figura 4.32: CDF de la SINR observada por los rUEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector)	158
Figura 4.33: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), desplegando los RNs a 2/3 del radio de la celda ($d = 2/3 \cdot R$) y en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$) ...	161
Figura 4.34: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes ($d = 2/3 \cdot R$).....	163
Figura 4.35: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes, mostrando el throughput agregado por zona ($d \approx 0.76 \cdot R$)	165
Figura 4.36: Estructura de combinación de tramas	166
Figura 4.37: Ejemplo de aplicación de la estructura de combinación de tramas	167
Figura 4.38: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A (2 RNs por sector).....	168
Figura 4.39: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas B (2 RNs por sector).....	170
Figura 4.40: RA de los esquemas CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A (2 RNs por sector) ..	174
Figura 4.41: RA de los esquemas CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas B (2 RNs por sector)...	176
Figura 4.42: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A y B (4 RNs por sector).....	181
Figura 4.43: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y	

CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs), para la configuración de 2 RNs por sector ($d = 2/3 \cdot R$).....	192
Figura 4.44: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs), para la configuración de 2 RNs por sector ($d \approx 0.76 \cdot R$)	195
Figura 4.45: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), siendo $d = 2/3 \cdot R$	199
Figura 4.46: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), siendo $d \approx 0.76 \cdot R$	202
Figura 4.47: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes ($d = 2/3 \cdot R$).....	204
Figura 4.48: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes, mostrando el throughput agregado por zona ($d \approx 0.76 \cdot R$)	205
Figura 5.1: Esquemas FFR y SFR, junto con varias configuraciones de despliegue de RNs.....	211
Figura 5.2: Diagrama de la segunda fase del algoritmo	213
Figura 5.3: Reparto de recursos frecuenciales para DeNBs y RNs en las subtramas de acceso	224
Figura 5.4: RA del esquema SFR_3GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)	234
Figura 5.5: Esquema de RA-ICIC para DeNBs utilizado como base para distribuir los recursos dinámicamente en las subtramas backhaul (2 RNs por sector).....	240
Figura 5.6: Diagrama de la operación del algoritmo completo	249
Figura 5.7: PDF del número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada enlace backhaul, para $NUE = 90, 99$ y 108	269
Figura 5.8: Resultados del esquema dinámico de RA-ICIC ($NUE = 108$).....	270
Figura 5.9: CDF del porcentaje de TUs descartados para los mUEs en ambos escenarios ($NUE = 108$)	271

Figura 5.10: CDF de la eficiencia por RB (bits/RB) lograda por los enlaces directos para ambos escenarios ($NUE = 108$)	272
Figura 5.11: CDF de la eficiencia por RB (bits/RB) lograda por los enlaces directos para ambos escenarios, separando los resultados por GrRBs ($NUE = 108$)	274
Figura 5.12: Ejemplo de distribución de usuarios para el escenario 1	276
Figura 5.13: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1 ($D_{maxu} = 50ms$)	277
Figura 5.14: CDF del porcentaje de TUs descartados para el escenario 1 ($NUE = 90$) ($D_{maxu} = 50ms$)	278
Figura 5.15: CDF del porcentaje de desviación entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo y el número de RBs que el algoritmo de RA realmente asigna a cada nodo para el escenario 1 ($NUE = 108$) ($D_{maxu} = 50ms$).....	279
Figura 5.16: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, cuando la cota máxima de retardo (D_{maxu}) se incrementa a 150ms	280
Figura 5.17: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, cuando se mantiene fijo el número medio de UEs concentrados alrededor de cada RN y se incrementa el número medio de UEs distribuidos uniformemente en el área de cobertura del DeNB ($D_{maxu} = 50ms$).....	281
Figura 5.18: Ejemplo de distribución de usuarios para el escenario 2	283
Figura 5.19: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 2 ($D_{maxu} = 50ms$)	283
Figura 5.20: CDF del porcentaje de TUs descartados para el escenario 2 ($NUE = 81$) ($D_{maxu} = 50ms$)	285
Figura 5.21: CDF del porcentaje de desviación entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo y el número de RBs que el algoritmo de RA realmente asigna a cada nodo para el escenario 2 ($NUE = 81$) ($D_{maxu} = 50ms$).....	286
Figura 5.22: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 2, cuando la cota máxima de retardo (D_{maxu}) se incrementa a 150ms	287
Figura 6.1: Asignación de recursos del esquema FFRopa	305
Figura 6.2: Curvas de las eficiencias por RB obtenidas offline	326
Figura 6.3: Resultados para la estrategia CP_teo (Modelo ON-OFF).....	330

Figura 6.4: Resultados para la estrategia CP_med (Modelo ON-OFF).....	332
Figura 6.5: Resultados para la estrategia CS_teo (Modelo ON-OFF).....	334
Figura 6.6: Resultados para la estrategia CS_med (Modelo ON-OFF).....	336
Figura 6.7: Resultados para la estrategia CS_med_ep (Modelo ON-OFF).....	346
Figura 6.8: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Satisfacción de tasa (Modelo ON-OFF)	348
Figura 6.9: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Datos buffer (Modelo ON-OFF)	350
Figura 6.10: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep_adap - Datos buffer (Modelo ON-OFF)	352
Figura 6.11: Modelo de tráfico de transmisión de video [76]	354
Figura 6.12: Resultados para la estrategia CS_med (Modelo Video)	357
Figura 6.13: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Datos buffer (Modelo Video).....	359
Figura 6.14: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep_adap - Datos buffer (Modelo Video).....	361

Lista de Tablas

Tabla 3.1: MCSs considerados	48
Tabla 3.2: Pedestrian-A extendido (3 km/h)	51
Tabla 3.3: Parámetros generales de simulación	58
Tabla 3.4: Esquema de CQI	59
Tabla 3.5: Parámetros del modelo ON-OFF y del mecanismo de ARQ	59
Tabla 3.6: Máscaras de potencia eNBs y PeNBs	60
Tabla 3.7: Porcentaje de UEs que se conectan a las picoceldas ($\theta = 30^\circ$)	67
Tabla 3.8: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 87$)	68
Tabla 3.9: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 87$)	70
Tabla 3.10: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 117$)	72
Tabla 3.11: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 117$)	73
Tabla 4.1: Parámetros generales de simulación	97
Tabla 4.2: Esquema de CQI	98
Tabla 4.3: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC preliminares [dBm/RB].....	100
Tabla 4.4: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas PFX (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)	104

Tabla 4.5: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2 (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)	107
Tabla 4.6: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC propuestos [dBm/RB].....	135
Tabla 4.7: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas Back_op3, Back_op4 y Back_op5 (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)	136
Tabla 4.8: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas SFR_2GrRBs y FFR_2GrRBs (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)	139
Tabla 4.9: Prestaciones de la definición de recursos prioritarios entre sectores [Mbps] (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	144
Tabla 4.10: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR para diferentes valores de bias (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	146
Tabla 4.11: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	148
Tabla 4.12: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	151
Tabla 4.13: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector y $\theta_0 = 30^\circ$)	152
Tabla 4.14: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$).....	155
Tabla 4.15: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$).....	159
Tabla 4.16: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$).....	160
Tabla 4.17: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC propuestos basados en la estructura de combinación de tramas [dBm/RB]	188
Tabla 4.18: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	189
Tabla 4.19: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$).....	193

Tabla 4.20: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector y $\theta_0 = 30^\circ$).....	194
Tabla 4.21: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_I = 45^\circ$).....	196
Tabla 4.22: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_I = 45^\circ$).....	200
Tabla 4.23: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_I = 45^\circ$)	201
Tabla 5.1: Parámetros generales.....	236
Tabla 5.2: Parámetros relacionados con la estimación de la demanda de RBs de los UEs	237
Tabla 5.3: Parámetros relacionados con la estimación de la cantidad de RBs que debería recibir cada nodo	237
Tabla 5.4: Parámetros relacionados con las restricciones impuestas por el esquema de ICIC	238
Tabla 5.5: Parámetros relacionados con la estimación de la tasa de datos alcanzable.....	238
Tabla 5.6: Decisiones de asignación de RBs para los RNs pares.....	242
Tabla 5.7: Decisiones de asignación de RBs para los RNs impares.....	242
Tabla 5.8: Restricciones de ICIC para la distribución de recursos frecuenciales	255
Tabla 5.9: Pseudo-código de la fase de redistribución de UEs	260
Tabla 5.10: Máscaras de potencia DeNBs y RNs [dBm/RB].....	264
Tabla 5.11: Parámetros de los dos modelos de tráfico	266
Tabla 6.1: Parámetros generales.....	305
Tabla 6.2: Parámetros relacionados con la estimación de RBs a nivel de usuario	306
Tabla 6.3: Parámetros relacionados con la estimación de RBs a nivel de sector	306

Tabla 6.4: Pseudo-código de la estimación teórica del consumo	310
Tabla 6.5: Parámetros generales de simulación	322
Tabla 6.6: Parámetros del modelo de tráfico ON-OFF	324
Tabla 6.7: Máscaras de potencia	324
Tabla 6.8: Eficiencias por RB obtenidas offline	326
Tabla 6.9: Pseudo-código del ajuste adaptativo de ε_{adap}	343
Tabla 6.10: Parámetros del modelo de tráfico de video	355

Lista de Acrónimos

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
ABS	Almost Blank Subframe
ACK	ACKnowledgement
AI	Artificial Intelligence
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BLER	BLock Error Rate
BW	BandWidth
CA	Carrier Aggregation
CAC	Call Admission Control
CDF	Cumulative Density Function
CINR	Channel to Interference and Noise Ratio
CP	Complete Partitioning
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CRE	Cell Range Expansion

CRS	Cell specific Reference Signal
CS	Complete Sharing
DeNB	Donor evolved NodeB
DL	DownLink
eNB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPRE	Energy Per RE
FD	Frequency Domain
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFR	Fractional Frequency Reuse
FRF	Frequency Reuse Factor
GBR	Guaranteed Bit Rate
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
ISD	Inter-Site Distance
ISR	Interference to Signal Ratio
ITU	International Telecommunication Union
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
LBCSM	Load Balanced Cell Selection Method
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
NACK	Negative-ACKnowledgement
NRT	Non-Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel
PDF	Probability Density Function
PDSCH	Physical Downlink Shared CHannel
PeNB	Pico evolved NodeB
PF	Proportional Fair
QoS	Quality of Service
RA	Resource Allocation
RA-PDCCH	Relay Access Physical Downlink Control CHannel
RA-PDSCH	Relay Access Physical Downlink Shared CHannel
RB	Resource Block
RE	Resource Element

RN	Relay Node
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RT	Real Time
R-PDCCH	Relay Physical Downlink Control CHannel
R-PDSCH	Relay Physical Downlink Shared CHannel
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SFR	Soft Frequency Reuse
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SIR	Signal to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TD	Time Domain
TDM	Time Division Multiplexing
TTI	Transmission Time Interval
TU	Transport Unit
UE	User Equipment
UL	UpLink

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y objetivos

El número de usuarios de las redes móviles ha crecido de forma exponencial durante los últimos años. Además, las aplicaciones que se usan en los terminales móviles demandan cada vez mayores tasas de datos, así como requisitos de QoS (Quality of Service) más exigentes, para poder ofrecer a los usuarios servicios en tiempo real como videollamadas, juegos online, streaming de video, etc. Esta demanda tan exigente conlleva que las redes móviles deben ser capaces de proporcionar un servicio ubicuo de calidad, de tal forma que los usuarios disfruten de una experiencia similar, sin importar su ubicación dentro de la celda. Una de las tecnologías candidatas a satisfacer estos crecientes requisitos de mayores tasas de tráfico y menores latencias, es LTE (Long Term Evolution), propuesta por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project) para cumplir el estándar IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced). El estándar IMT-Advanced recoge los requisitos considerados por la ITU (International Telecommunication Union) para los sistemas 4G. Sin embargo, LTE no satisface todos los requisitos del estándar IMT-Advanced, y por ello se propuso LTE-A (LTE-Advanced), introduciendo ciertas funcionalidades, como Carrier Aggregation (CA) para incrementar el ancho de banda de las redes, mejoras en técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output), o el soporte para el despliegue de relays.

Durante los últimos años se ha producido un gran despliegue de redes LTE a nivel comercial por todo el mundo, convirtiéndose en la actual red móvil de referencia. Las redes LTE se basan en la técnica de capa física OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), empleando como técnicas de

acceso al medio OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para el enlace ascendente. OFDM ofrece alta inmunidad a la propagación multicamino, permite un uso eficiente del espectro y proporciona escalabilidad del ancho de banda. Es gracias a estas características por lo que OFDM es ampliamente utilizada hoy en día, y no solo en el ámbito de las redes móviles (WiFi, DVB-T, etc.).

El espectro radio es un bien escaso y muy costoso económicamente, por lo que, si se quieren proporcionar altas tasas de datos, y además a un número elevado de usuarios (UE: User Equipment), las redes móviles 4G deben aplicar esquemas de reuso frecuencial muy agresivos, siendo generalmente el objetivo un reuso unidad, de tal forma que todas las celdas (eNB: evolved NodeB) de la red emplean el mismo ancho de banda. De esta forma se reduce el espectro frecuencial utilizado por la red, sin embargo, estos esquemas generan una fuerte interferencia inter-celular (ICI), que puede degradar las prestaciones de los usuarios, y en especial, de los usuarios que se encuentran en las zonas exteriores de las celdas. Los usuarios exteriores pueden observar niveles de SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) bajos debido a los fuertes niveles de ICI, lo que generalmente limita la tasa de datos alcanzable y define el esquema de codificación y modulación a emplear (MCS). Por lo tanto, es necesario aplicar mecanismos de control de la interferencia que mitiguen su efecto y permitan establecer comunicaciones fiables en los exteriores de las celdas.

No obstante, aunque se consideren mecanismos de control de la interferencia que permitan reducir los niveles de ICI, el objetivo de proporcionar un servicio ubicuo de calidad sigue quedando limitado, especialmente en áreas con alta concentración de usuarios, en zonas de sombra donde el nivel de señal útil recibido es muy bajo debido al entorno y en las zonas exteriores de las celdas. Una de las propuestas que se consideran dentro del marco de las redes LTE-A para dar solución a estas situaciones es el despliegue de nodos de baja potencia sobre las redes macrocelulares convencionales. Este tipo de despliegues se conoce con el nombre de redes heterogéneas, contemplándose diferentes alternativas basadas en el despliegue de distintos tipos de nodos de baja potencia: femtoceldas, picoceldas y relays.

Las femtoceldas son nodos de bajo coste y baja potencia de transmisión, que principalmente se despliegan en entornos interiores, como casas u oficinas. Una característica fundamental es que el enlace de la femtocelda con la infraestructura de la red móvil (enlace backhaul) se lleva a cabo a través de una red distinta a LTE. Normalmente es un enlace de banda ancha cableado, como puede ser una fibra óptica, o una línea ADSL. A través del enlace backhaul la femtocelda puede intercambiar información con otras femtoceldas o con las

macroceldas. El objetivo principal de este tipo de despliegue es mejorar la cobertura en entornos interiores, ya que las pérdidas de penetración de los edificios complican que las redes macrocelulares convencionales sean capaces de proporcionar altas tasas de datos en el interior de edificios. Generalmente las femtoceldas son desplegadas por los propios usuarios, siendo beneficioso tanto para los usuarios, que disponen de un punto de acceso a la red móvil propio, y dentro de su casa, como para los operadores, que se benefician de una mayor capacidad de red y eficiencia espectral con un coste asociado muy reducido.

La principal diferencia entre picoceldas (PeNB: Pico evolved NodeB) y femtoceldas es que las picoceldas son desplegadas por el propio operador, realizándose un despliegue coordinado de estos nodos de baja potencia. Uno de los objetivos principales de los despliegues de picoceldas es que permitan descargar tráfico de las macroceldas, especialmente en zonas donde la concentración de usuarios es elevada. El enlace backhaul con la red troncal es similar al de cualquier otra estación base (eNB). El área de cobertura que cubren las picoceldas es bastante inferior al cubierto por las macroceldas, y son nodos con menor coste económico, lo que ofrece una alternativa interesante a los operadores para incrementar la capacidad de la red en zonas con alta demanda de tráfico.

El tercer tipo de nodo de baja potencia considerado en las redes heterogéneas es el relay (RN: Relay Node). Una característica que hace a los relays muy interesantes desde el punto de vista de los operadores es que su enlace backhaul con la red troncal es inalámbrico, reduciéndose significativamente sus costes de despliegue. Los relays emplean la interfaz radio LTE para comunicarse con la macrocelda y acceder a la red troncal, por lo que los relays tienen que compartir los recursos radio disponibles con los usuarios conectados a su macrocelda. Por lo tanto, aunque los usuarios que se conectan a la red a través de los relays serán capaces de emplear MCSs más eficientes gracias a la cercanía de los relays, es necesario tener en cuenta el consumo adicional de recursos radio en los enlaces backhaul de los relays, al tratarse de una comunicación en dos saltos. En definitiva, la ganancia real solo se produce cuando un enlace que ofrece unas condiciones de canal pobres, se sustituye por dos enlaces de mayor calidad, de tal forma que el incremento de tasa obtenido gracias al uso de enlaces de mayor calidad supera el consumo extra de recursos asociado al uso de dos enlaces. El despliegue de relays permite extender la cobertura, incrementar la capacidad de la red y mejorar la experiencia de los usuarios que se encuentran en zonas donde los niveles de señal útil recibidos son bajos, como pueden ser zonas de sombra, o zonas de los exteriores de las celdas.

La ganancia que pueden proporcionar las redes heterogéneas es indudable, sin embargo, estos despliegues introducen diferentes retos y problemas técnicos,

que tienen que ser resueltos para poder materializar esa ganancia en escenarios reales. Uno de los principales retos es la gestión de la interferencia, y es que los nodos de baja potencia son desplegados sobre la cobertura de las macroceldas, y se espera que estos nodos de baja potencia empleen el mismo ancho de banda que las macroceldas. En las redes heterogéneas pueden diferenciarse dos capas de red, de tal forma que una capa está formada por las macroceldas, mientras que la otra capa está formada por los nodos de baja potencia. La interferencia que se produce entre nodos pertenecientes a la misma capa de red se conoce como interferencia co-layer. Mientras que a la interferencia que se produce entre nodos pertenecientes a distintas capas de red se la denomina interferencia cross-layer. Por lo tanto, además de considerar mecanismos de control de la interferencia co-layer entre macroceldas, es necesario analizar el nuevo escenario interferente de las redes heterogéneas, proponiendo nuevos mecanismos que permitan mitigar la interferencia cross-layer, así como la interferencia co-layer entre nodos de baja potencia si estos están desplegados en zonas cercanas.

Otro aspecto que impacta significativamente en las prestaciones de las redes heterogéneas es el criterio de selección de nodo. Generalmente, en las redes macrocelulares convencionales los usuarios se conectan a la celda de la que reciben el mayor nivel de potencia. Sin embargo, debido a la diferencia en la potencia de transmisión entre las macroceldas y los nodos de baja potencia, si se aplicase este criterio en las redes heterogéneas, solo unos pocos usuarios serían servidos por los nodos de baja potencia. De hecho, usuarios que se encuentran más cerca de un nodo de baja potencia que de la macrocelda, y que por lo tanto observan menores pérdidas de propagación respecto al nodo de baja potencia, podrían conectarse a la macrocelda debido a la diferencia en las potencias de transmisión. Por lo tanto, también es necesario proponer criterios de selección de nodo adecuados a los despliegues heterogéneos, con el objetivo de aprovechar lo máximo posible las ventajas que ofrece disponer de nodos de baja potencia que permitan ofrecer unas pérdidas de propagación bajas.

Una gestión efectiva de la interferencia pasa por la aplicación conjunta de mecanismos de coordinación en frecuencia y potencia y mecanismos de scheduling, que a una escala temporal pequeña ajustan las transmisiones de cara a conseguir el máximo aprovechamiento de la diversidad multiusuario y multicanal. No obstante, la aplicación de esquemas de coordinación de interferencia fijos limita la eficiencia de la red, ya que esta no puede adaptarse a las variaciones de carga. Por lo tanto, otro reto que se plantea en los despliegues heterogéneos, y al que tampoco son ajenos los despliegues homogéneos macrocelulares, es la “adaptación lenta” del algoritmo de coordinación (a una escala temporal más grande que el scheduling) para encontrar la combinación de parámetros de funcionamiento, reparto o compartición de recursos y criterio de

selección de nodo que maximizará la función de utilidad de la red (función de utilidad que depende no solo del grado de satisfacción de los parámetros de QoS, sino de requisitos de accesibilidad y mantenimiento del servicio, equitatividad, etc.). La obtención de una solución óptima se complica al considerar no sólo de qué manera esa combinación se ajustará a las condiciones cambiantes de la carga de la red, sino cómo los nodos y estaciones involucradas obtendrán, difundirán o intercambiarán información y se coordinarán para dar soporte a este algoritmo de adaptación lenta.

Además de considerar soluciones para implementar una “adaptación lenta” del esquema de coordinación de interferencias y reparto de recursos, también se requiere considerar otros mecanismos, como el control de admisión. El control de admisión es el encargado de evaluar la conveniencia de aceptar una nueva conexión que requiere recursos del nodo. No debe olvidarse que los recursos con los que se cuenta son limitados y por ello no siempre será posible dar servicio a todos los usuarios que lo requieran, ya que podría sobrepasarse la capacidad del nodo de acceso y en ese caso todas las conexiones en curso verían degradadas sus prestaciones, hecho que debe evitarse en la medida de lo posible. En términos generales, el control de admisión suele englobar dos aspectos: por un lado, el cálculo de la capacidad del nodo y el consumo de recursos de los usuarios, y por otro lado, aplicar políticas de admisión, las cuales definen las condiciones que deben darse para que una nueva conexión sea aceptada. Esta estimación de la capacidad disponible, y del consumo de las nuevas conexiones puede no ser simple, ya que el comportamiento de las estrategias de gestión de recursos radio puede ser diferente dependiendo de la distribución espacial de los usuarios, de las condiciones de canal que estén experimentando, de la movilidad de los usuarios, etc. Por lo tanto, es importante analizar diferentes alternativas de estimación de la capacidad y consumo de los usuarios, así como considerar políticas de admisión que busquen evitar que se sobrepase la capacidad total de la celda.

Recientemente se han comenzado a desplegar las primeras redes móviles 5G, no obstante, las redes 5G no van a reemplazar a las redes 4G por el momento, sino que se espera que durante los próximos años coexistan ambos tipos de redes. De hecho, dentro de las primeras especificaciones del 3GPP para las redes 5G (5G New Radio (NR)) se considera una versión NSA (Non-StandAlone), en la que se mantiene la red troncal LTE (EPC: Evolved Packet Core). Como se ha visto, las redes LTE todavía tienen que solventar diferentes retos para poder satisfacer la alta demanda de tasa de datos de los usuarios, sin importar su movilidad, o su ubicación dentro de las celdas. La potencialidad del uso de redes heterogéneas queda avalada por el considerable esfuerzo investigador invertido en este tipo de soluciones. En este contexto, esta tesis se centra en proponer y evaluar estrategias de gestión de recursos y gestión de interferencias en el enlace

descendente para garantizar la coexistencia entre las macroceldas y los nodos de baja potencia desplegados en ellas, centrándose en picoceldas y relays. En primer lugar, el trabajo se centra en desarrollar y evaluar estrategias de gestión de recursos a nivel de enlace que den soporte a las distintas soluciones de despliegue heterogéneo. Para posteriormente centrarse en estrategias de soporte a la coexistencia en condiciones cambiantes de carga y movilidad. Bajo estas condiciones de movilidad se requiere considerar de forma conjunta mecanismos que se condicionan entre sí: criterios de selección de nodo, handover y control de admisión, estimación de consumo y capacidad, así como la aplicación de estrategias adaptativas de reuso frecuencial.

Para evaluar las diferentes propuestas que se presentan en esta tesis se ha continuado el desarrollo de un simulador de redes móviles en C++ ya existente. Este simulador ha sido desarrollado completamente dentro del grupo de investigación, por lo que la flexibilidad de cara a la implementación y evaluación de los distintos aspectos considerados en esta tesis ha sido total. Como punto de partida de esta tesis se utilizó el simulador ya existente, que permitía modelar de forma realista redes macrocelulares homogéneas, teniendo en cuenta 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. Dentro del trabajo realizado en la tesis se ha añadido toda la capa correspondiente con el despliegue de nodos de baja potencia, así como la implementación de todos los algoritmos de gestión de recursos, criterios de selección de nodo y estrategias de control de admisión propuestas en la tesis.

1.2 Estructura de la tesis

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

En el capítulo 2 se revisa la problemática de la gestión de interferencias en redes macrocelulares LTE homogéneas. Posteriormente se presenta cómo se lleva a cabo la gestión de recursos radio a nivel de macrocelda en esta tesis, ya que será el punto de partida para las estrategias de gestión de recursos y coordinación de interferencias que se proponen en los siguientes capítulos.

En el capítulo 3 se presenta una revisión del estado del arte sobre diferentes estrategias de coordinación de interferencias y criterios de selección de nodo centradas en el despliegue de picoceldas. Posteriormente, y basado en este análisis, se proponen y evalúan distintos esquemas de coordinación de interferencias que tienen en cuenta el esquema de coordinación de interferencias que se utiliza a nivel de macrocelda, con el objetivo de coordinar los recursos

frecuenciales empleados por ambas capas de la red, para así mejorar la capacidad de la red completa. Además, también se evalúan las prestaciones de uno de los criterios de selección de nodo propuestos en la literatura que se considera como más interesante, bajo diferentes escenarios.

El capítulo 4 continua con estrategias de gestión de interferencia fijas, pero en este caso centradas en el despliegue de relays. Como el enlace backhaul de los relays utiliza la interfaz aire LTE, la gestión de recursos se complica todavía más, ya que estos enlaces deben compartir recursos frecuenciales con los usuarios de la red. En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte, para posteriormente, proponer y evaluar diferentes alternativas de coordinación de interferencias estáticas, que permiten coordinar los recursos empleados por ambas capas de la red, y que buscan maximizar la capacidad total de la red.

El capítulo 5 supone una extensión del capítulo anterior, pero considerando condiciones cambiantes de carga y movilidad. Se comienza el capítulo revisando el estado del arte acerca de estrategias dinámicas de gestión de recursos e interferencia, así como criterios de selección de nodo que sean capaces de operar bajo condiciones cambiantes de carga. Basándose en este análisis, y en las estrategias de coordinación de interferencias estáticas evaluadas en el anterior capítulo, se propone y evalúa un algoritmo que combina una distribución dinámica de recursos frecuenciales entre nodos y enlaces, y un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga para tratar de maximizar las prestaciones del sistema.

Continuando con condiciones cambiantes de carga y movilidad, el capítulo 6 se centra en un mecanismo interrelacionado con las estrategias de gestión de recursos radio y los criterios de selección de nodo, como es el control de admisión. En primer lugar, se presenta una revisión del estado del arte de las principales propuestas encontradas en la literatura, para posteriormente proponerse diferentes estrategias de control de admisión enfocadas a despliegues macrocelulares homogéneos, que son evaluadas empleando diferentes modelos de tráfico.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones más relevantes de esta tesis, así como las principales futuras líneas de investigación que se plantean.

Capítulo 2

Gestión de la Interferencia en Redes Macrocelulares Homogéneas

Dentro de los objetivos de la tesis se considera el desarrollo de estrategias de gestión de recursos y gestión de interferencias, que permitan la coexistencia entre las redes macrocelulares existentes y el despliegue de nodos de baja potencia. Para contextualizar estas propuestas, en este capítulo se realiza una revisión de la problemática de la gestión de interferencias en redes macrocelulares LTE homogéneas. Hay que tener en cuenta que el despliegue de nodos de baja potencia sobre la cobertura de redes macrocelulares introduce un nuevo escenario interferente. Además, el mecanismo de control de la ICI que se utilice a nivel de macrocelda tendrá un fuerte impacto en las prestaciones de los nodos de baja potencia. Por lo tanto, es necesario revisar y adaptar los mecanismos de control de la ICI que se aplican sobre redes macrocelulares homogéneas.

En primer lugar, se realiza una breve descripción de la tecnología OFDMA, para introducir los principales aspectos de esta tecnología que están relacionados con la gestión de los recursos radio. Posteriormente se revisa la problemática de la ICI en redes macrocelulares LTE, analizando brevemente los mecanismos de control de la ICI más relevantes que se han propuesto en la literatura, para centrarnos fundamentalmente en esquemas de ICIC (Inter-Cell Interference Coordination). Finalmente se presenta cómo se lleva a cabo la gestión de recursos radio a nivel de macrocelda en esta tesis, ya que será el punto de partida para las estrategias de gestión de recursos y coordinación de interferencias que se proponen en los siguientes capítulos.

2.1 Tecnología OFDMA para redes LTE

Las redes LTE se basan en la técnica de capa física OFDM, empleando OFDMA como técnica de acceso al medio para el enlace descendente (DL: DownLink). OFDMA permite el reparto de recursos radio en dos dimensiones (tiempo y frecuencia), y desde el punto de vista de la gestión de recursos radio, una de las principales características es la flexibilidad en la asignación de recursos, es decir, la flexibilidad en la cantidad de recursos que pueden asignarse a cada usuario, lo que se traduce en el soporte de multitud de tipos de tráfico y calidades de servicio diferentes.

En rasgos generales, el ancho de banda total del sistema se divide en N_{FFT} subportadoras OFDM ortogonales, separadas entre sí Δf Hz. Cada una de estas subportadoras puede transportar un símbolo de datos distinto, lo que permite adaptar la transmisión de cada símbolo a las condiciones de canal. De todas estas subportadoras, sólo N_a transmiten potencia, dejando subportadoras libres a ambos lados del ancho de banda (bandas de guarda) para limitar las interferencias en canales adyacentes. Además, parte de las subportadoras se usan para transmitir señales piloto que permiten realizar la estimación de canal en recepción. De esta forma, el espectro de una señal OFDM puede esquematizarse como el mostrado en la Figura 2.1.

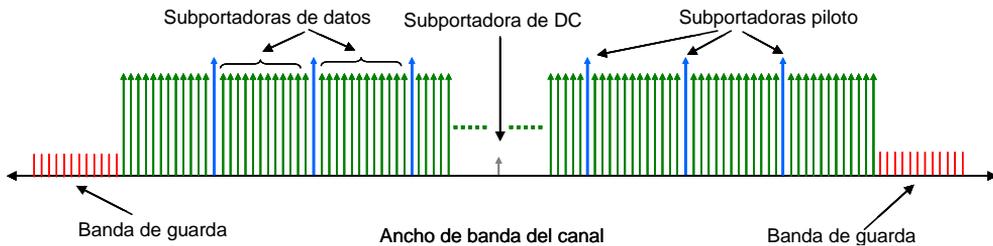


Figura 2.1: Espectro de la señal OFDM

La unidad temporal más básica es el símbolo OFDM, y con el objetivo de mitigar el efecto de la propagación multicamino, en cada símbolo OFDM se inserta un prefijo cíclico (CP: Cyclic Prefix) al inicio del símbolo, que se genera copiando los últimos T_g segundos del símbolo OFDM original. A partir del símbolo OFDM, se define una estructura de transmisión temporal jerárquica formada por tramas de duración 10ms, cada una de las cuales está compuesta por 10 subtramas de 1ms. A su vez, cada subtrama se divide en 2 slots de 7 o 6 símbolos OFDM, dependiendo de la configuración empleada para el CP. La trama determina la periodicidad del envío de los parámetros que permanecen estables en el sistema, mientras que la subtrama (1ms) determina la periodicidad con la que en LTE se actualizan las decisiones de scheduling de recursos

frecuenciales y temporales (TTI: Transmission Time Interval). En la Figura 2.2 se muestra la estructura de trama LTE.

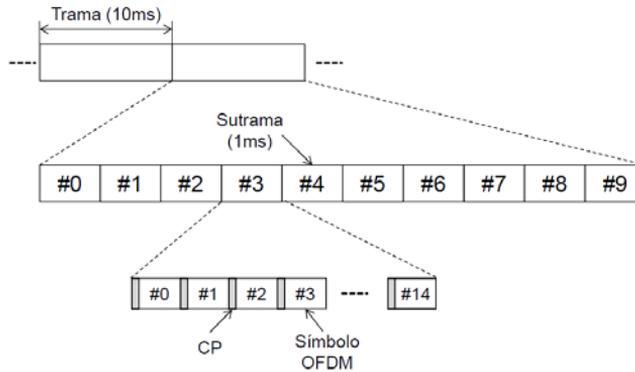


Figura 2.2: Estructura de trama LTE

Al considerar OFDMA como técnica de acceso, en un instante determinado es posible transmitir simultáneamente información hacia varios usuarios de la celda. El nivel de control de acceso al medio (MAC: Medium Access Control) deberá repartir los recursos frecuenciales y temporales entre los diferentes usuarios de la manera más eficiente posible, de forma que un usuario recibe en cada asignación un conjunto de recursos frecuenciales durante un conjunto de símbolos. Idealmente, el mecanismo de acceso OFDMA permitiría realizar cualquier reparto de subportadoras entre usuarios y con la granularidad deseada. Sin embargo, este acceso requiere de una cantidad de señalización desmesurada para cubrir cualquier posibilidad. Por ello, se suele apostar por definir bloques de recursos radio (RB: Resource Block), de tal forma que un RB es la unidad mínima de asignación en el sistema. Cada RB comprende N_{SC} subportadoras OFDM, durante N_T símbolos OFDM consecutivos de una subtrama. 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 $[N_{SC} \times N_T]$ REs. Así, un ejemplo del mapa tiempo-frecuencia de una comunicación OFDMA puede esquematizarse como se muestra en la Figura 2.3, donde cada color representa a qué usuario se ha asignado cada RB.

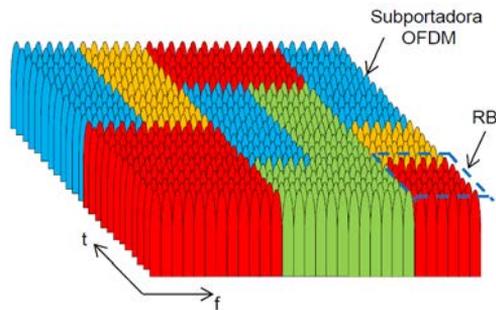


Figura 2.3: Ejemplo del mapa tiempo-frecuencia en una comunicación OFDMA

2.2 Mecanismos de control de la ICI en redes macrocelulares homogéneas

Como se ha comentado, el espectro radioeléctrico es un recurso muy escaso, y por ello se plantea la reutilización de frecuencias en las redes móviles LTE-A, para poder alcanzar un mayor aprovechamiento del mismo. Sin embargo, esta reutilización de frecuencias conlleva la aparición de interferencia intercelular cuando el mismo canal se asigna en celdas que se encuentran cerca. Merece la pena destacar, que durante toda la tesis utilizamos la palabra celda para referirnos a la zona de cobertura de un eNB. El objetivo de la mayoría de los sistemas móviles de banda ancha es realizar un despliegue de una única portadora con reuso unidad, es decir, que todas las celdas de la red utilicen el mismo ancho de banda de forma simultánea. Un despliegue con un factor de reuso frecuencial igual a la unidad supone un ahorro en el espectro radio, mejorando enormemente su utilización, pero al mismo tiempo provoca fuertes interferencias inter-celulares (ICI), especialmente a los usuarios situados cerca de los límites de las celdas. Si esta interferencia inter-celular no se gestiona adecuadamente, los usuarios de las zonas exteriores de las celdas pueden observar niveles de SINR demasiado bajos, haciendo imposible la demodulación de los datos recibidos. Por lo tanto, es necesario aplicar mecanismos de control de la interferencia que mitiguen su efecto y permitan establecer comunicaciones fiables en los exteriores de las celdas.

Los mecanismos de control de interferencias pueden clasificarse en tres grandes grupos: mitigación de interferencias, cancelación de interferencias y coordinación de interferencias. La mitigación de interferencias consiste en aplicar distintas técnicas para aleatorizar la señal interferente, de modo que presente poca correlación con la señal útil. No obstante, la ganancia que proporcionan es reducida, por lo que debería utilizarse siempre junto con otro mecanismo de control de interferencias. Por otro lado, la cancelación de

interferencias pretende, por medio de un fuerte procesado de señal, suprimir la potencia interferente, o al menos la interferencia dominante. Sin embargo, estas técnicas de cancelación son costosas computacionalmente, y además por norma general suelen imponer fuertes restricciones a la red, lo que dificulta su aplicación práctica. Es por ello que la coordinación de interferencias ha sido considerada como el mecanismo fundamental para el control de las interferencias en las redes móviles LTE, y en la tesis nos centramos en este tipo de mecanismos.

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 reduzca la interferencia sufrida por los usuarios, y especialmente, la de los usuarios situados en el límite de la celda. La interrelación entre el mecanismo de coordinación de la ICI y los algoritmos de scheduling es tan fuerte que es preciso analizar también si las restricciones debidas al primero, que generalmente se refieren a los recursos tiempo-frecuencia asignables y a la potencia de transmisión permitida, no limitan de forma exagerada la accesibilidad a los recursos. Por lo tanto, es esperable una reducción en el throughput medio de la celda, pero un aumento significativo en el throughput de los UEs situados en el exterior de la misma.

Dependiendo del recurso coordinado, existen tres tipos fundamentales de esquemas de coordinación: coordinación en potencia, en frecuencia y en tiempo. La coordinación en tiempo requiere una sincronización entre celdas bastante precisa, al mismo tiempo que se limitan las libertades del scheduler al fijar determinados instantes temporales en los que no se permite transmitir a los usuarios de los exteriores de la celda. Estas consideraciones justifican que, en la inmensa mayoría de las propuestas de la literatura, se trabaje únicamente con coordinación en frecuencia y potencia, obteniéndose generalmente mejores prestaciones cuando se definen esquemas que combinan ambos tipos de coordinación.

El principio fundamental de las soluciones basadas en una coordinación mixta en frecuencia y potencia 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 los límites entre celdas, al tiempo que se proporciona una accesibilidad suficiente a los usuarios interiores, para que estas restricciones no limiten en exceso el throughput global de la celda. Este tipo de soluciones de ICIC se basan generalmente en dos esquemas típicos de coordinación frecuencial, como son la sectorización y el reuso fraccional.

La técnica de reuso frecuencial fraccional (FFR: Fractional Frequency Reuse) está ampliamente extendida en la literatura, y se basa en la aplicación de diferentes factores de reuso frecuencial dentro de la celda. De esta forma, en el interior de la celda se aplica generalmente un reuso unidad para mejorar la accesibilidad a los recursos, aprovechando que los usuarios interiores están mejor aislados frente a la ICI. Mientras que en el exterior de la celda se utiliza generalmente un reuso 3, de modo que las celdas vecinas utilizan recursos frecuenciales ortogonales, con el objetivo de mantener unas condiciones de interferencia suficientemente buenas en los límites de las celdas. El esquema FFR fue propuesto por primera vez en [1] para redes de primera generación, y es también una solución ampliamente aceptada para redes LTE.

En la literatura pueden encontrarse diversas variantes que aplican el principio del reuso fraccional, siendo dos de las más extendidas las conocidas como soft FFR y partial FFR. El esquema soft FFR [2–4], también conocido como SFR (Soft Frequency Reuse), fue uno de los primeros en aparecer en el contexto de las redes móviles OFDMA, y en este esquema, el ancho de banda del sistema se divide en tres subbandas, tal y como aparece en la Figura 2.4(a). Dos de estas subbandas se planifican para el interior de la celda (representadas en color morado), mientras que la subbanda restante se planifica para el exterior de la celda, transmitiéndose con mayor potencia para alcanzar los límites de las celdas. Las celdas vecinas utilizan para los usuarios del exterior una subbanda distinta, de tal forma que se reduce la interferencia sufrida por estos usuarios.

El esquema SFR permite asignar todo el ancho de banda disponible en todas las celdas, alcanzando el reuso unidad tanto en la subbanda interior, como en la exterior, y ofreciendo una alta accesibilidad a los recursos frecuenciales. No obstante, y a pesar de que se escogen subbandas exteriores diferentes para las celdas vecinas, los usuarios del exterior siguen recibiendo interferencia de las subbandas interiores de las celdas vecinas. Además, como los recursos de las subbandas interiores pueden ser asignados por cualquiera de los sectores de la celda, la interferencia recibida por los usuarios exteriores presentará una alta variabilidad, limitando las prestaciones obtenidas por los usuarios exteriores. Para contrarrestar esta situación surge el esquema hard FFR, también conocido como partial FFR, o incluso como simplemente FFR en muchos trabajos de la literatura. La principal diferencia del esquema partial FFR es que las subbandas interiores y exteriores siempre ocupan recursos frecuenciales diferentes a lo largo de toda la red. De acuerdo a la literatura, podemos diferenciar dos opciones para el esquema partial FFR, en la que una de ellas se basa en una subbanda exterior ortogonal, mientras que la otra se basa en una sectorización de la subbanda exterior.

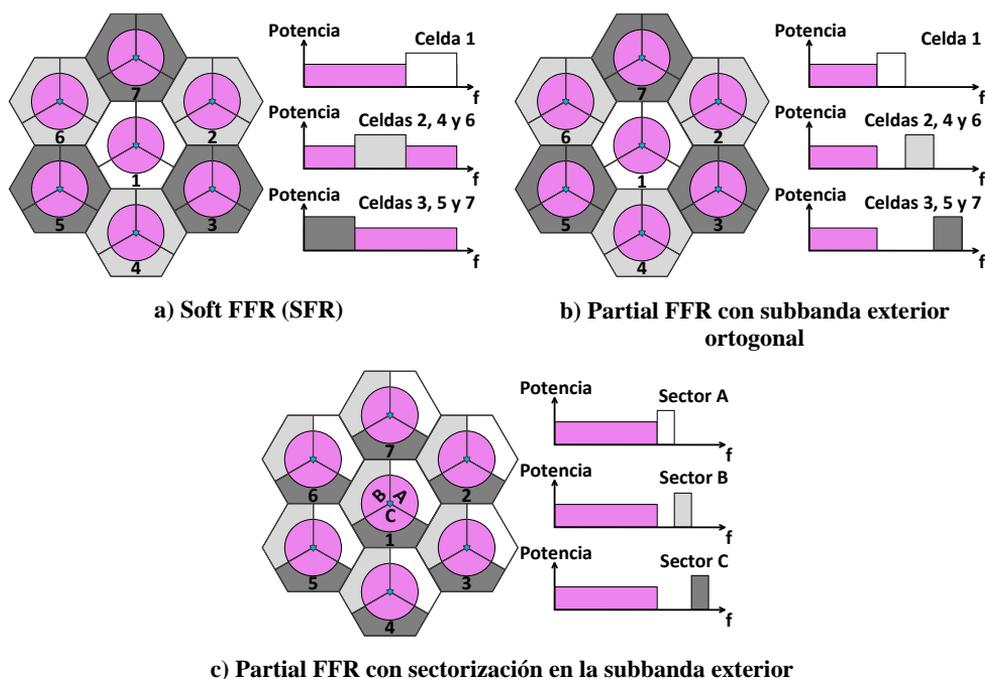


Figura 2.4: Principales esquemas FFR

En la Figura 2.4(b) se representa el esquema partial FFR con subbanda exterior ortogonal [5–7]. Gracias a que las subbandas exteriores de las celdas emplean diferentes recursos frecuenciales a los empleados en la subbanda interior, y gracias a que además las subbandas exteriores de las celdas vecinas son ortogonales, se consigue estabilizar y reducir la ICI sufrida por los usuarios exteriores. Sin embargo, como contrapartida, se reducen los recursos disponibles en las celdas, ya que se reduce el reuso frecuencial de la red. En la subbanda interior se aplica un reuso unidad, mientras que en la subbanda exterior se aplica un reuso 3.

En la segunda opción considerada en la literatura [8–10], todo el ancho de banda del sistema está disponible en cada celda, aplicando reuso unidad tanto en la subbanda interior, como en la exterior. No obstante, para controlar la ICI sufrida por los usuarios exteriores se aplica sectorización en la subbanda exterior, tal y como se representa en la Figura 2.4(c). Por lo tanto, ambas opciones permiten estabilizar la interferencia sufrida por los usuarios exteriores, mejorando las prestaciones del sistema con respecto al esquema SFR [11–13]. Sin embargo, la alternativa de definir subbandas exteriores ortogonales reduce demasiado los recursos disponibles para ser asignados por las celdas, siendo la alternativa de aplicar sectorización en la subbanda exterior la opción preferida.

Por último, cabe destacar que en la literatura pueden encontrarse numerosas variantes generadas a partir de los esquemas que se han presentado. Sin embargo, el trabajo que se recoge en esta tesis se va a centrar en los esquemas presentados basados en la técnica de reuso frecuencial fraccional (FFR), ya que estos esquemas permiten alcanzar un buen compromiso entre la reducción y estabilización de la ICI, y la accesibilidad de los recursos.

2.3 Gestión de recursos radio a nivel de macrocelda

A lo largo de esta tesis se considera una comunicación con duplexado en frecuencia (FDD: Frequency Division Duplex) de los enlaces ascendente (UL: UpLink) y descendente (DL). Se ha modelado de forma detallada el enlace descendente y de forma muy simplificada, pero realista, el enlace ascendente. Las entidades asociadas a la gestión de recursos, incluyendo el control de potencia, la asignación de recursos frecuenciales y temporales, la gestión de las retransmisiones y la selección adaptativa del MCS, están localizadas en las estaciones base (eNB: evolved NodeB), y son controladas por el scheduling. Las decisiones de scheduling, que se realizan cada TTI (1ms), se llevan a cabo de forma independiente en cada eNB, considerando las restricciones impuestas por los esquemas de coordinación de interferencias. 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). No obstante, no se conoce una solución óptima para llevar a cabo de forma simultánea todas estas tareas (scheduling temporal y frecuencial, adaptación de potencia y tasa y control de interferencia), por lo que pueden encontrarse múltiples propuestas en la literatura, con diferentes grados de simplificación.

En esta tesis, la asignación de recursos es vista como un problema multidimensional. De tal forma que, en primer lugar, el esquema de coordinación de interferencia determina (estáticamente a escala de TTI) qué parte de los recursos frecuenciales debe restringirse en cada celda, sector, o área de la celda (interior, exterior). Posteriormente, es el scheduler el que selecciona en cada TTI qué recursos se asignan a cada usuario. El scheduler se basa en dos componentes separadas, pero no independientes, que se aplican de forma secuencial: temporal y frecuencial. Primero, la componente en el dominio temporal (TD), después de chequear el nivel de ocupación de los buffers de las conexiones (datos nuevos y pendientes de retransmisiones), tiempo de espera, etc., determina en base a una métrica (por ejemplo, estado del canal, satisfacción de un determinado throughput, retardo, tamaño del buffer, etc.) el conjunto priorizado de usuarios que son candidatos para recibir recursos en un TTI. Posteriormente, la componente en el dominio de la frecuencia (FD) elige qué

recursos (RB y potencia) asignar a cada uno de estos usuarios candidatos, además de la tasa permitida (MCS), de acuerdo con la información disponible sobre el estado del canal de cada usuario. En términos generales, el scheduling frecuencial tiene como objetivo obtener un aprovechamiento máximo de los recursos radio disponibles proporcionando la asignación de recursos más eficiente para cada 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 va orientado a garantizar la satisfacción de los requisitos de QoS de los distintos servicios, así como a garantizar una distribución equitativa de recursos entre todos los usuarios, por medio de la priorización de los tráficos a la hora de asignar recursos.

En redes OFDMA, la ICI tiene una naturaleza altamente variable e impredecible, siendo pocas las fuentes que contribuyen a generar la componente dominante de esta interferencia, típicamente las dos o tres celdas interferentes más próximas [5]. Por lo tanto, las condiciones particulares de estas celdas interferentes dominantes son las que determinarán en buena medida la interferencia sufrida por los usuarios. Si las celdas están poco cargadas, será probable que se produzcan cambios en la ocupación de los recursos frecuenciales, es decir, que de una subtrama a la siguiente se cambien los recursos en los que se transmite potencia. Esta situación puede verse como un efecto ON-OFF en la interferencia recibida por los usuarios, contribuyendo a aumentar la variabilidad de la ICIC. Por otro lado, incluso en condiciones de alta carga la potencia con la que las celdas transmiten en cada recurso puede variar, como resultado de las decisiones de scheduling tomadas por las celdas. A estas situaciones, hay que añadir también la variabilidad que introduce el canal radio entre el usuario y cada una de las celdas interferentes. Por lo tanto, esta variabilidad en la interferencia que reciben los usuarios se traduce en que las condiciones de interferencia reales que el usuario observa en el momento de recibir la señal, difieren de las condiciones de interferencia que se habían estimado para decidir la asignación de recursos. Esto provoca un gran aumento en el número de errores en la asignación de recursos, incrementando la BLER (Block Error Rate), ya que los usuarios pueden observar niveles de SINR mucho más bajos que los estimados, siendo incapaces de demodular los datos recibidos correctamente. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se puede concluir que la variabilidad de la interferencia es un factor a considerar durante el diseño de mecanismos de control de la interferencia y algoritmos de asignación de recursos.

Si se toma como referencia el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior (Figura 2.4(c)), este esquema ofrece una gran accesibilidad a los recursos frecuenciales, sin embargo, al considerar pocas restricciones en la

asignación de RBs de la subbanda interior, puede observarse el denominado efecto de ON-OFF de la interferencia, especialmente en situaciones de baja carga. Por lo tanto, una alternativa interesante para controlar este efecto de ON-OFF de la interferencia pasa por considerar un algoritmo de asignación de recursos, que en la medida de lo posible confine las transmisiones en los mismos RBs a lo largo del tiempo. Para ello, es necesario añadir ciertas restricciones al scheduling que pueden conllevar un aumento del bloqueo, ya que se reduce la accesibilidad a los recursos frecuenciales. No obstante, estas restricciones permiten reducir la variabilidad de la ICI, permitiendo reducir la BLER, y mejorando las prestaciones del sistema como se vio en [14], donde se propuso el esquema FFR_{opa} (FFR with frequency occupation ordering and power adaptation). El esquema FFR_{opa} se deriva del esquema FFR, pero incorporando ciertas mejoras. En concreto, una de las mejoras consiste en controlar la variabilidad de la interferencia en la zona interior, realizando una asignación ordenada de RBs en esta zona, de tal forma que se concentran las transmisiones en un subconjunto de recursos. La segunda mejora consiste en incorporar cierta flexibilidad en la asignación de potencia.

2.3.1 FFR with frequency occupation ordering and power adaptation (FFR_{opa})

Uno de los principales objetivos del esquema FFR_{opa} es tratar de mantener estable el conjunto de RBs en los que se llevan a cabo las transmisiones en la zona interior de los eNBs, para de esta forma reducir la variabilidad de la ICI. En concreto, la asignación de recursos se lleva a cabo de tal forma que los recursos reservados para la subbanda interior se dividen en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna a uno de los tres sectores de la celda. En primera aproximación, se realiza una asignación ordenada de RBs siguiendo el ordenamiento mostrado en la Figura 2.5. De esta forma se intenta conseguir que las transmisiones de cada sector queden siempre confinadas dentro del mismo conjunto de recursos frecuenciales.

Sin embargo, la asignación ordenada limita en exceso la posibilidad de obtener beneficio de la diversidad multiusuario y multicanal en el scheduling frecuencial. Es por ello que, en realidad, la asignación no es estrictamente ordenada, sino que se define un grupo de RBs dentro de la subbanda interior preasignada a cada sector, que recibe el nombre de grupo inicial (SG: Starting Group). El número de RBs que componen este grupo inicial puede variar dinámicamente a lo largo del tiempo, y para hacer una estimación de los RBs que se van a necesitar en un TTI, y por lo tanto definir el grupo inicial, se ha considerado emplear el número de RBs que han sido ocupados en el TTI anterior por cada sector. Teniendo en cuenta este SG, los usuarios, que estarán ordenados

de acuerdo al criterio empleado por el scheduling temporal, irán recibiendo asignaciones en los RBs en los que observan mejores condiciones de canal dentro del grupo inicial de su sector, y una vez que se hayan ocupado todos los RBs que forman el grupo inicial, se seguirán asignando el resto de RBs de la subbanda interior preasignada al sector siguiendo la ordenación.

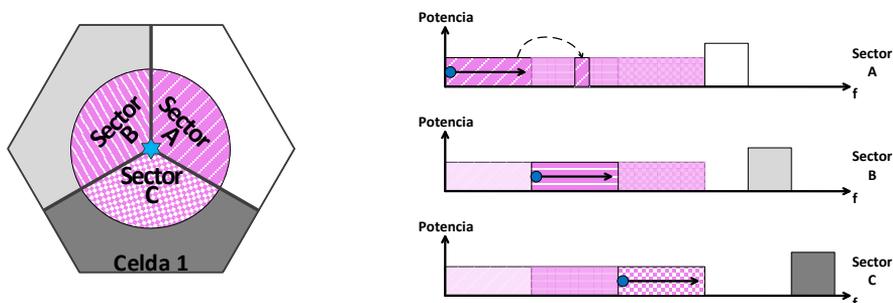


Figura 2.5: Asignación ordenada de RBs en la subbanda interior (FFRopa)

Aunque de forma inicial los recursos frecuenciales pertenecientes a la subbanda interior se dividen en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna a un sector, cuando un sector ocupa todos los RBs de su subbanda comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda. Como el scheduling frecuencial se lleva a cabo para todos los UEs de la celda teniendo en cuenta la priorización marcada por el scheduling temporal, cuando el sector al que pertenece un usuario tiene completa su subbanda preferente, se comenzará a robar RBs del sector que tenga menor ocupación. Además, si por ejemplo se toma como referencia el sector A como en la Figura 2.5, comenzará a robar el primer RB libre de la subbanda preasignada al sector B, que sería el sector que tiene menor ocupación de la celda. Posteriormente, el sector B continuará asignando el resto de RBs de su subbanda siguiendo el ordenamiento descrito. Por otro lado, para la subbanda exterior de recursos se aplica una sectorización estricta con el objetivo de mejorar la calidad de la señal para los UEs localizados en el exterior de las celdas. De esta forma, sólo los usuarios del sector pueden recibir los RBs planificados para la subbanda exterior del propio sector. Los RBs disponibles en el sistema se dividen de tal forma, que $2/3$ son planificados para la subbanda interior, mientras que el $1/3$ restante se planifica para la subbanda exterior. Merece la pena destacar que no se permite que se asigne el mismo RB de forma simultánea en dos sectores pertenecientes a la misma celda, ya que la interferencia inter-sector que se generaría sería demasiado agresiva, reduciendo las prestaciones del sistema. Finalmente, y tal y como se representa en la Figura 2.6, las celdas adyacentes comienzan a asignar los recursos frecuenciales en diferentes puntos de cada una de las subbandas interiores, de tal forma que en

condiciones de baja carga se consigue que celdas vecinas empleen recursos ortogonales, minimizando la ICI del sistema.

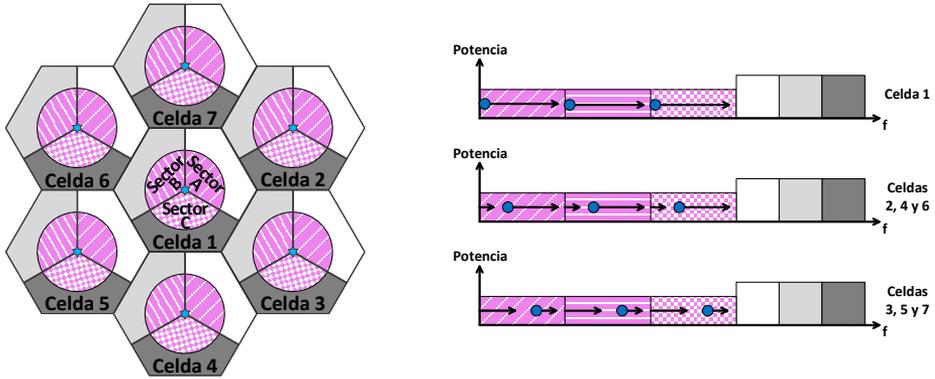


Figura 2.6: Asignación de recursos del esquema FFRopa

Además de esta ordenación en la asignación de recursos frecuenciales, el esquema FFRopa también incorpora una asignación adaptativa de potencia. De forma inicial se definen dos niveles de potencia transmitida media en la máscara de potencia: M_{med}^{int} para la subbanda interior de recursos y M_{med}^{ext} para la subbanda exterior, siendo la potencia de transmisión en la subbanda exterior más alta que en la subbanda interior, con el fin de alcanzar a los usuarios situados en los límites de las celdas. Si se aplica una asignación fija de potencia, cuando un usuario recibe un RB, se le asignará la máscara media (M_{med}) en el RB correspondiente. El objetivo de emplear potencia constante en las asignaciones es disminuir la variabilidad de la interferencia, sin embargo, como contrapartida tenemos el hecho de que un usuario puede quedarse sin recibir asignación si la potencia requerida supera la máscara, aunque sea por muy poca diferencia. Por lo tanto, esta limitación lleva a considerar un ajuste adaptativo de la potencia de transmisión que permita asignar a un mayor número de usuarios, pero limitando a su vez la variabilidad de la interferencia. Este ajuste adaptativo de potencia solo se lleva a cabo en la subbanda interior, mientras que en los recursos de la subbanda exterior se aplica una asignación fija de potencia, para limitar lo máximo posible la variabilidad en la interferencia.

El algoritmo de adaptación se representa esquemáticamente en la Figura 2.7. La potencia requerida por el usuario u en el RB f ($P_{req,u}^f$) se calcula como se muestra en la ecuación (2.1), donde $SINR_{req}^m$ es la SINR mínima del MCS m que se pretende asignar al UE y $CINR_{est,u}^f$ es la CINR que se estima que observará el usuario u en el RB f . La potencia requerida por los usuarios se representa mediante una línea discontinua roja. Los usuarios que tienen una potencia requerida inferior a M_{med} (UE 0, UE 2 y UE 3) generan un margen de potencia

$(M_{med} - P_{req,u}^f)$ que se invierte en incrementar la potencia de transmisión para los usuarios que requieren una potencia superior a M_{med} (UE 1 y UE 4). De esta forma, de acuerdo al ejemplo representado en la Figura 2.7, la potencia que sobra del UE 0 puede por ejemplo invertirse en los usuarios UE 1 y UE 4, permitiendo aumentar la potencia de transmisión para que ambos usuarios sean capaces de recibir la asignación. Con el objetivo de evitar que estos ajustes adaptativos de la potencia transmitida aumenten en exceso la variabilidad de la interferencia, la potencia asignada a cada usuario siempre debe permanecer entre dos umbrales: M_{min} y M_{max} . De tal forma que, si la potencia requerida por un usuario es inferior al umbral M_{min} , el sistema asume que la potencia requerida por ese usuario es M_{min} . Este sería por ejemplo el caso del UE 2 mostrado en la Figura 2.7. Por el contrario, si la potencia requerida por un usuario supera el umbral M_{max} , el sistema asume que ese usuario no va a poder recibir la asignación.

$$P_{req,u}^f = \frac{SINR_{req}^m}{CINR_{est,u}^f} \quad (2.1)$$

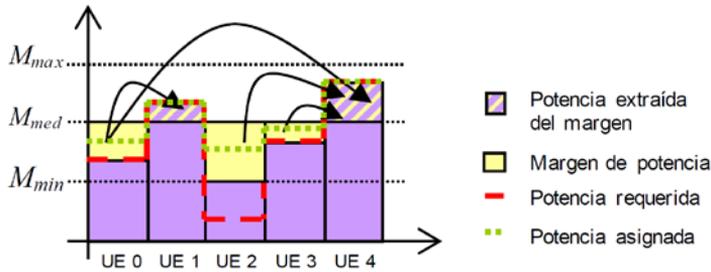


Figura 2.7: Asignación adaptativa de potencia (FFRopa)

Una vez que se han realizado todas las asignaciones de RBs, se procede a reajustar la potencia preasignada de modo que no se exceda el límite máximo de potencia transmitida en la celda ($P_{T,max}$). Si la potencia total preasignada no excede $P_{T,max}$, porque ningún usuario ha excedido M_{med} o porque se han quedado RBs sin asignar que compensan el exceso de potencia, se valida la preasignación de potencia realizada. De esta forma, los usuarios con buenas condiciones de canal experimentarán un gran margen frente a interferencias al tener asignada una potencia igual a M_{med} , lo que permitirá incrementar su MCS para transmitir de forma más eficiente. Por otro lado, cuando la potencia total preasignada excede $P_{T,max}$, es necesario extraer potencia de los usuarios que generan margen. Para ello se extrae potencia de todos los usuarios cuya potencia requerida es inferior a M_{med} de forma proporcional al margen de potencia que observan. De esta forma, se extrae más potencia de aquellos usuarios que observan un mayor

margen de potencia, alcanzado un tratamiento más igualitario de los usuarios y manteniendo un margen de potencia frente a las variaciones del canal o de la interferencia. Como puede verse en el ejemplo mostrado en la Figura 2.7, para compensar el exceso de potencia de los usuarios UE 1 y UE 4, se extrae más potencia de los usuarios que disponen de un mayor margen, como por ejemplo el UE 2.

2.3.1.1 Scheduling frecuencial

En [15] puede encontrarse una descripción detallada del algoritmo de scheduling frecuencial asociado al esquema FFRopa, aunque a continuación se detallan las características más relevantes. En primer lugar, el scheduling frecuencial intentará asignar al UE en RBs pertenecientes a la subbanda interior, intentándolo asignar en los RBs pertenecientes al SG de su sector en los que observa mejores condiciones. Si el SG de su sector ya ha sido asignado por completo, el scheduler intenta asignar al UE en los RBs de la subbanda interior preasignada a su sector, siguiendo el orden descrito en el esquema FFRopa (subapartado 2.3.1). Finalmente, si toda la subbanda interior preasignada al sector que da servicio al UE ya ha sido asignada, el scheduler intenta asignar al UE en los RBs de la subbanda interior preasignada al sector con menor ocupación, siguiendo el orden descrito en el esquema FFRopa. Si la asignación del UE no es posible en la subbanda interior, se inicia un proceso de renegociación, que permite reubicar a otros UEs ya asignados en otros RBs (siempre que satisfagan los requisitos de SINR), con el objetivo de liberar RBs que puedan ser asignados al UE que se está considerando. Si finalmente la asignación del UE no es posible en la subbanda interior, se intenta asignar al UE en los RBs pertenecientes a la subbanda exterior de su sector en los que observa las mejores condiciones de canal, incluyendo también el proceso de renegociación si fuera necesario.

Merece la pena destacar que después de realizar una asignación de RBs se vuelven a calcular los índices de prioridad temporal de todos los usuarios, se reordenan los usuarios con la nueva prioridad actualizada y se escoge al usuario más prioritario para la siguiente asignación. De tal forma que un usuario puede recibir varias asignaciones en un mismo TTI. Finalmente, una vez que se han realizado todas las asignaciones se lleva a cabo el ajuste de potencia. Por otro lado, el scheduling frecuencial también se encarga de realizar la adaptación de tasa, seleccionando el MCS para cada asignación, en función de los CQIs (Channel Quality Indicators) del usuario. Siempre se garantiza que la SINR que se estima que observará el UE en el RB es igual o mayor que la SINR requerida por el MCS m asignado ($SINR_{req}^m$). Además, hay que tener en cuenta que se utilizará el mismo MCS en todos los RBs asignados a un UE en un mismo TTI.

Capítulo 3

Despliegues Heterogéneos con Picoceldas: Gestión de Interferencias y Criterio de Selección de Nodo

Como se ha comentado, uno de los principales objetivos de las redes LTE actuales es proporcionar una alta tasa de datos de forma ubicua, de tal forma que los usuarios puedan satisfacer sus altas demandas de tasas de datos, sin importar su ubicación dentro de la red. Una de las propuestas que se consideran para cumplir este objetivo son las redes heterogéneas, y este capítulo se centra en despliegues heterogéneos con picoceldas (PeNBs). Las picoceldas son desplegadas sobre el área de cobertura de las macroceldas por los operadores, llevándose a cabo un despliegue coordinado. Uno de sus principales objetivos es que permitan descargar tráfico de las macroceldas, especialmente en zonas donde la concentración de usuarios es elevada. Sin embargo, como se busca que las picoceldas puedan asignar a sus usuarios en los mismos recursos frecuenciales que son empleados por las macroceldas, aparecen nuevos escenarios interferentes que necesitan ser gestionados correctamente para materializar la ganancia potencial del despliegue heterogéneo con picoceldas.

En las redes heterogéneas pueden diferenciarse dos capas de red, de tal forma que una capa está formada por las macroceldas, mientras que la otra capa está formada por los nodos de baja potencia. Como ya se ha introducido, esto permite clasificar la interferencia dependiendo de las capas involucradas. Así, la interferencia que se genera entre nodos pertenecientes a la misma capa de la red se conoce como interferencia co-layer. Mientras que a la interferencia que se

produce entre nodos pertenecientes a distintas capas de red se la denomina interferencia cross-layer. En la Figura 3.1 se representan ejemplos de los diferentes escenarios interferentes que pueden generar los despliegues de picoceldas en el enlace descendente (DL). En el primer escenario se considera la situación en la que un usuario conectado a una picocelda (pUE) recibe interferencia del propio eNB en el que está desplegada la picocelda que le da servicio. Aunque los pUEs se encuentren más cerca de su PeNB que del eNB, la diferencia en la potencia transmitida entre eNBs y PeNBs, puede provocar que la interferencia cross-layer recibida del eNB en el que se encuentra desplegado su PeNB sea muy agresiva. Además, tampoco se puede despreciar la interferencia cross-layer que reciben los pUEs de los eNBs vecinos, especialmente cuando el PeNB está desplegado en las zonas exteriores de su eNB.

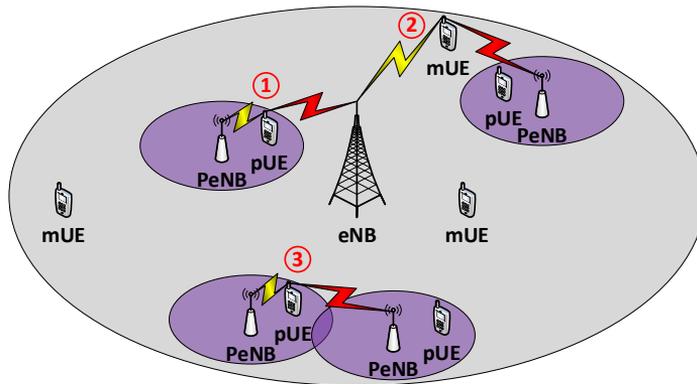


Figura 3.1: Escenarios interferentes en el enlace descendente

En el segundo escenario, un usuario conectado a la macrocelda (mUE) es interferido por una picocelda cercana. Esta interferencia también se clasifica como interferencia cross-layer, y aunque la potencia de transmisión de los PeNBs sea baja, será necesario analizar el impacto que pueda tener esta interferencia en las prestaciones de los mUEs. Finalmente, en el escenario 3 un pUE recibe interferencia de una picocelda cercana. En este caso se trata de interferencia co-layer y su impacto dependerá en gran medida de la densidad y distribución del despliegue de picoceldas. Las picoceldas son desplegadas por el operador, y aunque la densidad del despliegue sea alta, se puede asumir un despliegue coordinado. Además, la potencia de transmisión de las picoceldas es reducida, por lo que generalmente los niveles de interferencia co-layer generados entre picoceldas no serán muy agresivos.

Las femtoceldas presentan bastantes similitudes con las picoceldas, sin embargo, la principal diferencia es que las femtoceldas son desplegadas por los propios usuarios, y generalmente en entornos interiores, como casas u oficinas. Como las femtoceldas son desplegadas directamente por los usuarios, se

distinguen tres métodos de acceso. Uno de ellos sería acceso abierto, de tal forma que todos los usuarios de la red pueden conectarse a las femtoceldas. El segundo método es acceso cerrado, donde solo los usuarios abonados o autorizados pueden conectarse a la femtocelda. Y por último se dispone de un método intermedio, que es el acceso híbrido, en el que los usuarios no abonados pueden conectarse a la femtocelda, pero solo pueden acceder a una parte de los recursos, para dar prioridad a los usuarios abonados.

Los escenarios interferentes que plantean las femtoceldas son los mismos que los recogidos en la Figura 3.1 para el caso de las picoceldas, sin embargo, el método de acceso empleado tiene un fuerte impacto sobre ellos, principalmente sobre los escenarios dos y tres. Respecto al escenario 2, si la femtocelda cercana está configurada con acceso cerrado, por muy cerca que se encuentre el mUE de ella, no podrá conectarse, y por lo tanto, la interferencia cross-layer que recibe puede tener un impacto muy significativo sobre sus prestaciones. La interferencia co-layer entre femtoceldas vecinas contemplada en el escenario 3 también se agrava, ya que las femtoceldas no se despliegan de forma coordinada. Además, si se considera acceso cerrado, la interferencia co-layer puede ser excesiva si la densidad del despliegue es elevada.

Ya se ha visto la importancia de la aplicación de técnicas de coordinación de interferencias en entornos macrocelulares, especialmente para poder garantizar condiciones de interferencia adecuadas a los usuarios que se encuentran en las zonas exteriores de las celdas. Por lo tanto, si se quiere evitar que aparezcan agujeros de cobertura provocados por la interferencia generada entre ambas capas de la red, será necesario adaptar los esquemas de ICIC aplicados sobre redes celulares convencionales a las nuevas condiciones de interferencia generadas en las redes heterogéneas. De esta forma se podrá alcanzar la ganancia potencial de los despliegues de picoceldas, y los usuarios que se conecten a las picoceldas podrán verse beneficiados de observar buenas condiciones de canal, gracias a la reducida distancia respecto a la picocelda que les da servicio.

Por otro lado, otro aspecto que también impacta de forma significativa en las prestaciones de los despliegues heterogéneos es el criterio de selección de nodo. Generalmente, en las redes macrocelulares homogéneas los usuarios se conectan a la celda de la que reciben un mayor nivel de RSRP (Reference Signal Received Power), que mide la potencia que recibe un UE de las señales de referencia esparcidas por el ancho de banda del sistema. Sin embargo, debido a la diferencia en la potencia de transmisión entre las macroceldas y los nodos de baja potencia, usuarios que observen menores pérdidas de propagación respecto a un nodo de baja potencia podrían conectarse a la macrocelda ya que reciben mayores niveles de RSRP, provocando que solo unos pocos usuarios sean servidos por los nodos de baja potencia. Esta situación se agrava a medida que

los nodos de baja potencia son desplegados más cerca de los eNBs, ya que el nivel de potencia recibido del eNB es más fuerte. Por ello también es necesario revisar los criterios de selección de nodo que se aplican convencionalmente sobre despliegues homogéneos, con el objetivo de favorecer que un mayor número de usuarios puedan verse beneficiados de observar menores pérdidas de propagación con las picoceldas que se encuentren próximas.

En este capítulo se presenta en primer lugar una revisión del estado del arte sobre diferentes estrategias de coordinación de interferencias y criterios de selección de nodo centradas en despliegues heterogéneos con picoceldas. Basándonos en esta revisión, posteriormente se proponen distintos esquemas de coordinación de interferencias que tienen en cuenta el esquema de ICIC que se utiliza a nivel de macrocelda, con el objetivo de coordinar los recursos frecuenciales empleados por ambas capas de la red, para así mejorar la capacidad de la red completa. Además, también se considera uno de los criterios de selección de nodo propuestos en la literatura que se considera como más interesante, y que persigue expandir el área de cobertura de las picoceldas. Finalmente, se evalúan las prestaciones de los esquemas de coordinación de interferencias propuestos y del criterio de selección de nodo considerado, bajo diferentes escenarios de carga y de despliegue.

3.1 Estado del Arte

Para poner en contexto el trabajo considerado en este capítulo, en este apartado se presenta una revisión bibliográfica de diferentes propuestas encontradas en la literatura, centradas en la coordinación de interferencias y criterios de selección de nodo para despliegues heterogéneos con picoceldas. Algunas de las propuestas abordan la coordinación de interferencias desde el dominio frecuencial, imponiendo restricciones a los recursos frecuenciales que pueden ser usados por cada una de las capas de la red, para garantizar recursos en los que los niveles de interferencia cross-layer son reducidos. Otras propuestas realizan la coordinación en el dominio de la potencia, ya sea de forma independiente, o de forma conjunta con estrategias de coordinación frecuencial. Por otro lado, también se revisan varias propuestas en las que la coordinación se realiza en el dominio temporal, centrándose fundamentalmente en restringir las subtramas en las que pueden transmitir los eNBs, para proporcionar recursos con menores niveles de interferencia cross-layer a los usuarios conectados a los PeNBs. Sin embargo, la mayoría de las propuestas se centran en estrategias para reducir la interferencia cross-layer, pero no consideran un esquema de ICIC entre eNBs, que permitiría reducir la ICI, además de poder añadir cierta coordinación entre los recursos frecuenciales empleados. Respecto al criterio de selección de nodo, algunas de estas

propuestas consideran una estrategia ampliamente extendida en la literatura, que persigue incrementar el área de cobertura de los nodos de baja potencia.

3.1.1 Gestión de interferencias en despliegues heterogéneos con picoceldas

En [16] consideran el despliegue de una red de macroceldas con reuso frecuencial unidad, sobre las que se despliegan doce PeNBs de forma aleatoria en cada una de las macroceldas. No consideran un esquema de ICIC entre macroceldas, y para gestionar la interferencia cross-layer proponen un esquema de coordinación de interferencias que se basa en un reuso parcial entre ambas capas de la red. Por lo tanto, todo el ancho de banda del sistema está disponible en todas las celdas, y el reparto entre ambas capas se realiza de tal forma que una parte del ancho de banda se reserva para uso exclusivo de las picoceldas, otra parte se reserva para uso exclusivo de las macroceldas, mientras que los recursos restantes son compartidos por ambas capas. El tamaño de cada una de las particiones se basa en catalogar a los usuarios en “protegidos” o “no protegidos”, donde un usuario se cataloga como protegido si observa unos niveles de SINR demasiado bajos, o si recibe una fuerte componente de interferencia cross-layer. A estos usuarios se les denomina protegidos porque recibirán asignaciones de recursos en los RBs reservados para su capa, en los que se ha eliminado la interferencia cross-layer. Por el contrario, los usuarios no protegidos recibirán asignaciones en los RBs compartidos entre ambas capas de la red. El ratio entre los usuarios protegidos y no protegidos será el que determine el tamaño de las particiones del ancho de banda del sistema.

La propuesta de reservar ciertos recursos para cada capa de la red permite eliminar la interferencia cross-layer en esos recursos, sin embargo, no se aplica ninguna coordinación para mitigar la interferencia co-layer, ni entre eNBs vecinos, ni entre PeNBs vecinos, ya que, aunque la potencia de transmisión de los PeNBs sea reducida, se considera el despliegue aleatorio de varios PeNBs sobre la cobertura de cada eNB. Por lo tanto, un usuario que observe niveles bajos de SINR debido a una fuerte interferencia co-layer, no verá mejoradas sus prestaciones de forma significativa por el hecho de recibir asignaciones en los recursos reservados para su capa de la red. Además, la aplicación de un esquema de ICIC entre eNBs permitiría reducir los niveles interferentes, y por tanto, aumentar la cantidad de RBs que son reutilizados por ambas capas. Ya que, si gran parte de los recursos del sistema son considerados reservados para una de las capas de la red, se reduce el reuso frecuencial, provocando una baja disponibilidad de recursos frecuenciales y reduciendo las prestaciones de los usuarios.

Para estimar el tamaño de cada una de las particiones del ancho de banda, la propuesta se basa en clasificar a los UEs en función de su SINR, estimada a partir de la RSRP de los diferentes nodos de la red, y de un factor que mide la interferencia cross-layer sufrida por los mUEs (R_I^{mUE}) y los pUEs (R_I^{pUE}). I_{eNBs} es la estimación de la interferencia que el UE recibe de todos los eNBs interferentes en todo el ancho de banda del sistema, mientras que I_{PeNBs} es la estimación de la interferencia que el UE recibe de todos los PeNBs interferentes en todo el ancho de banda del sistema. Por lo tanto, el factor R_I obtenido mediante la ecuación (3.1) permite obtener el ratio entre la interferencia co-layer, y la interferencia cross-layer.

$$R_I^{mUE} = \frac{I_{eNBs}}{I_{PeNBs}} \quad (3.1)$$

$$R_I^{pUE} = \frac{I_{PeNBs}}{I_{eNBs}}$$

Los UEs que observan niveles bajos de SINR, y los UEs que aun observando niveles de SINR adecuados obtienen un factor R_I por debajo del umbral, son clasificados como UEs protegidos, tal y como se muestra en las ecuaciones (3.2) y (3.3). De esta forma se obtiene el conjunto de mUEs que deben ser protegidos ($U_{protegidos}^{mUEs}$), y el conjunto de pUEs que deben ser protegidos ($U_{protegidos}^{pUEs}$). Hay que tener en cuenta que en el caso de los UEs que observan niveles de SINR adecuados, pero a su vez observan un factor R_I bajo, la interferencia proviene en mayor parte de la otra capa de la red, y por lo tanto, su nivel de SINR podría empeorar debido a esa dominancia de la interferencia cross-layer.

$$\left. \begin{array}{l} \{mUE / SINR < \Gamma_{bajo}^{SINR}\} \\ \{mUE / \Gamma_{bajo}^{SINR} < SINR < \Gamma_{alto}^{SINR}, R_I^{mUE} < \Gamma_{R_I}^{mUE}\} \end{array} \right\} \subset U_{protegidos}^{mUEs} \quad (3.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \{pUE / SINR < \Gamma_{bajo}^{SINR}\} \\ \{pUE / \Gamma_{bajo}^{SINR} < SINR < \Gamma_{alto}^{SINR}, R_I^{pUE} < \Gamma_{R_I}^{pUE}\} \end{array} \right\} \subset U_{protegidos}^{pUEs} \quad (3.3)$$

Una vez que se han estimado los conjuntos de UEs protegidos para ambas capas de la red ($U_{protegidos}^{mUEs}$ y $U_{protegidos}^{pUEs}$), se obtiene la cantidad de RBs que se reservan para cada una de las capas, $NRB_{reservados}^{mUEs}$ y $NRB_{reservados}^{pUEs}$, mediante la ecuación (3.4), donde $||$ permite obtener la cardinalidad de los conjuntos de UEs protegidos, $NmUE_{total}$ y $NpUE_{total}$ representan el número total de UEs conectados a los eNBs y a los PeNBs respectivamente, y N_c representa el número total de RBs disponibles en el sistema.

$$\begin{aligned}
 NRB_{reservados}^{mUEs} &= \left[\frac{|U_{protegidos}^{mUEs}|}{NmUE_{total}} \cdot N_c \right]_+ \\
 NRB_{reservados}^{pUEs} &= \left[\frac{|U_{protegidos}^{pUEs}|}{NpUE_{total}} \cdot N_c \right]_+
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

En los RBs reservados para los mUEs ($NRB_{reservados}^{mUEs}$) solo transmitirán los eNBs, asignando en esos RBs al conjunto $U_{protegidos}^{mUEs}$. Por otro lado, en los RBs reservados para los pUEs ($NRB_{reservados}^{pUEs}$) solo transmitirán los PeNBs, asignando en dichos RBs al conjunto $U_{protegidos}^{pUEs}$. De esta forma se elimina la interferencia cross-layer en los RBs reservados, mejorando los niveles de SINR de los UEs protegidos de ambas capas de la red. El resto de RBs del sistema son reutilizados por los eNBs y por los PeNBs, para asignar a los UEs no protegidos.

En [17, 18] consideran el despliegue de una red macrocelular con reúso frecuencial unidad, sobre las que se despliegan un conjunto de femtoceldas de forma aleatoria en cada una de las macroceldas, considerando acceso cerrado y que las femtoceldas son desplegadas en entornos interiores. De la misma forma que en [16], no consideran un esquema de ICIC entre macroceldas que permita reducir los niveles interferentes sufridos en las zonas exteriores de las celdas, centrándose las propuestas en tratar de reducir la interferencia cross-layer generada por los despliegues de nodos de baja potencia. En particular, la propuesta presentada en [17, 18] considera que los eNBs utilizan todo el ancho de banda del sistema, mientras que los nodos de baja potencia reutilizan solo una parte del ancho de banda, escogiendo además los recursos de forma aleatoria, con el objetivo de reducir la interferencia cross-layer generada por las femtoceldas sobre los mUEs que se encuentran en sus proximidades. Hay que tener en cuenta que los autores consideran un escenario en el que las femtoceldas son desplegadas en entornos interiores, con acceso cerrado, y sirviendo además a una pequeña cantidad de UEs autorizados que se encuentran bastante cerca de su femtocelda. Por lo tanto, los autores se centran en la interferencia cross-layer generada por los nodos de baja potencia sobre los mUEs que se encuentran en las proximidades, dejando de lado la interferencia cross-layer que sufren los UEs conectados a los nodos de baja potencia, ya que se encuentran bastante protegidos. Como las femtoceldas escogen aleatoriamente los RBs en los que van a transmitir en cada subtrama, la interferencia se dispersa en todo el ancho de banda del sistema, y todos los RBs tienen la misma probabilidad de evitar la interferencia cross-layer proveniente de las femtoceldas.

Si se considera la aplicación de esta propuesta sobre un escenario con despliegue de picoceldas, en el que se espera que las picoceldas sean desplegadas en entornos exteriores y en zonas con una gran densidad de

usuarios, la interferencia cross-layer que sufren los pUEs proveniente de los eNBs no puede ser despreciada. Es cierto que, en una situación de baja carga, como las picoceldas escogerían los RBs de forma aleatoria, se reduce la probabilidad de que eNB y PeNB escojan el mismo RB en una determinada subtrama. Sin embargo, en una situación de alta carga en la que la ocupación del eNB sea alta, la interferencia sufrida por los pUEs que se encuentran alejados de su PeNB puede ser excesiva, al no aplicarse ninguna coordinación entre los recursos empleados por eNB y por los PeNBs desplegados sobre su área de cobertura. Además, la selección aleatoria por parte de las picoceldas provoca un aumento en la variabilidad de la interferencia.

El ratio de RBs que pueden asignar los nodos de baja potencia se define como el factor α , tal y como se representa en la ecuación (3.5), donde NRB_{LPNs} es el número de RBs que pueden asignar los nodos de baja potencia, y N_c es el número total de RBs disponibles en el sistema. α es un parámetro de diseño de la red, y en una implementación sencilla podría ser el mismo para todos los nodos de baja potencia de la red. Sin embargo, en una implementación más optimizada se podría ajustar el valor de α para cada nodo, considerando aspectos como la carga de cada nodo, la interferencia que introduce cada nodo, etc. La propuesta considera que cada femtocelda escoja NRB_{LPNs} RBs de forma aleatoria entre todos los RBs disponibles en el sistema (N_c) y en cada subtrama, para posteriormente asignar a sus UEs en los RBs seleccionados.

$$\alpha = \frac{NRB_{LPNs}}{N_c} \quad (3.5)$$

Las propuestas previas se centran en tratar de reducir la interferencia cross-layer generada por los despliegues de nodos de baja potencia, sin embargo, no consideran un esquema de ICIC a nivel de eNB para reducir los niveles de ICI recibidos por los UEs, especialmente en las zonas exteriores de las celdas, quedando limitada la ganancia obtenida por los despliegues heterogéneos con picoceldas. Los métodos de coordinación de interferencias se basan en aplicar restricciones en la asignación de recursos a determinados usuarios a lo largo de la red. Por lo tanto, se pueden aprovechar estas restricciones para coordinar los recursos frecuenciales empleados por los PeNBs, con los recursos frecuenciales que son asignables por el eNB en la zona concreta en la que se encuentran desplegados los PeNBs. De esta forma, además de reducir los niveles de ICI provenientes de las celdas vecinas gracias a la aplicación de un esquema de ICIC, se pueden ofrecer a los PeNBs recursos frecuenciales donde la interferencia cross-layer proveniente del eNB es más débil, mejorando las prestaciones de la red.

En [19, 20] consideran el despliegue de una red de macroceldas con reúso frecuencial unidad, sobre las que se despliegan un conjunto de picoceldas de forma aleatoria en cada una de las macroceldas. Se emplea el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior como esquema de ICIC entre macroceldas, lo que permite mejorar las prestaciones del sistema, especialmente la de los mUEs situados en los bordes de las celdas. Con el objetivo de minimizar la interferencia cross-layer sufrida por los UEs que se conectan a los nodos de baja potencia, la propuesta considera que los nodos de baja potencia puedan asignar los RBs que no son usados por la macrocelda en la zona en la que están desplegados. En la Figura 3.2 se representa la propuesta de coordinación de interferencias, que se basa el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior. De esta forma, si una picocelda es desplegada en la zona interior de la celda en un determinado sector, la picocelda puede asignar a sus pUEs en las subbandas exteriores de los dos sectores restantes de su celda. Si se toma como ejemplo el PeNB 1 representado en rojo en la Figura 3.2, como está desplegado en la zona interior del sector A, este PeNB podrá asignar a sus pUEs en las subbandas exteriores de los sectores B y C. Los RBs de la subbanda interior, como pueden ser asignados por cualquiera de los tres sectores del eNB, no se consideran adecuados para el PeNB, ya que cuando los RBs son asignados por el propio sector en el que está desplegado el PeNB, la interferencia sufrida por los pUEs puede ser excesiva. Por otro lado, si la picocelda se despliega en la zona exterior de la celda en un determinado sector, además de poder asignar a sus pUEs en las subbandas exteriores de los dos sectores restantes, también se añaden como recursos disponibles todos los RBs de la subbanda interior. Si se toma como ejemplo el PeNB 2 representado en azul en la Figura 3.2, como está desplegado en la zona exterior del sector A, este PeNB podrá asignar a sus pUEs en la subbanda interior y en las subbandas exteriores de los sectores B y C. Como la picocelda está desplegada más lejos del eNB, la interferencia cross-layer generada sobre los pUEs en los RBs de la subbanda interior que son asignados por el propio sector en el que está desplegada la picocelda es más leve.

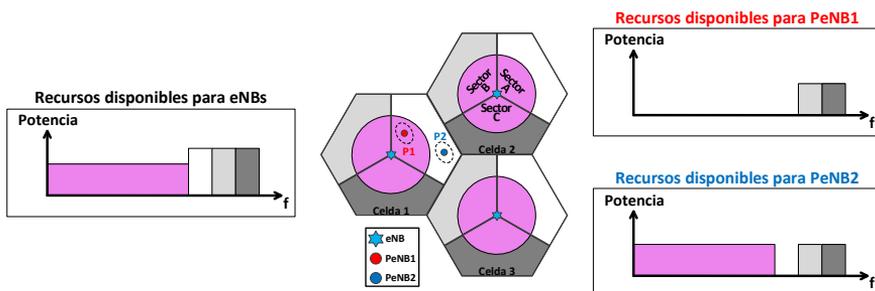


Figura 3.2: Propuesta de ICIC basada en FFR para despliegues heterogéneos con picoceldas

Como la propuesta considera que los PeNBs asignen a sus pUEs en los RBs que no son asignados por el eNB en la zona en la que el PeNB está desplegado, también se reduce la interferencia que los PeNBs pueden generar sobre mUEs que se encuentren en sus proximidades. Este tipo de propuestas permite aprovechar la coordinación de interferencias a nivel de macrocelda, para coordinar también los recursos que pueden ser empleados por los nodos de baja potencia, proporcionando a estos nodos un conjunto de RBs con mejores niveles de interferencia cross-layer, y reduciendo a su vez la interferencia cross-layer generada sobre los mUEs que se encuentran cerca de los nodos de baja potencia.

En [21] los autores proponen emplear SFR como esquema de ICIC entre eNBs (Figura 2.4(a)), y que los nodos de baja potencia que se despliegan sobre la cobertura de los eNBs cuenten con funcionalidades cognitivas. Consideran el despliegue de una red macrocelular con reuso frecuencial unidad, sobre las que se despliegan un conjunto de femtoceldas de forma aleatoria en cada una de las macroceldas, considerando femtoceldas con acceso cerrado. La propuesta considera que cada eNB envíe a los nodos de baja potencia desplegados sobre su cobertura, un informe sobre los RBs que están siendo asignados a los mUEs de su zona (interior o exterior) y de su sector. Por lo tanto, el eNB solo necesitaría conocer el sector en el que está desplegado cada nodo de baja potencia, y si este está desplegado en la zona interior o exterior de la celda. El nodo de baja potencia escanea el espectro frecuencial, para estimar la interferencia recibida en cada RB. Considerando estas estimaciones, y el informe recibido de su eNB, los nodos de baja potencia deciden el conjunto de RBs que puede asignar a sus pUEs, escogiendo aquellos RBs que reciben menores niveles interferentes, y tratando de evitar los RBs que son empleados por el eNB en la zona en la que está desplegado.

La consideración de nodos con funcionalidades cognitivas, capaces de escanear el espectro, y analizar la interferencia observada, para seleccionar aquellos recursos que mejores condiciones ofrecen, pueden mejorar las prestaciones de esquemas más estáticos, basados en una coordinación de los RBs que son empleados por los eNBs en base a las restricciones impuestas por los esquemas de ICIC aplicados a nivel de eNB, como los propuestos en [19, 20]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para materializar una ganancia significativa en escenarios reales, hay que solucionar retos asociados a las soluciones cognitivas, como el overhead ocasionado por el intercambio de información entre los diferentes nodos de la red, la necesidad de desplegar nodos con mayor capacidad computacional que puedan ejecutar los algoritmos de selección de recursos frecuenciales, o las limitaciones de un escaneo que permita detectar los recursos más adecuados de forma efectiva. Por lo tanto, las ganancias potenciales de las soluciones cognitivas no siempre son fácilmente alcanzables, y además, es necesario analizar si las ganancias son suficientemente

significativas para compensar el overhead de señalización, así como el incremento de coste de este tipo de nodos.

3.1.2 Criterio de selección de nodo para despliegues heterogéneos

Como se ha comentado, además de considerar esquemas de coordinación de interferencias que permitan gestionar los nuevos escenarios interferentes que introducen las redes heterogéneas, también es necesario revisar los criterios de selección de nodo aplicados convencionalmente en las redes homogéneas. Para escenarios con despliegue de picoceldas se ha propuesto el uso del criterio de selección de nodo conocido como Cell Range Expansion (CRE) [22], que se ha considerado ampliamente en la literatura durante los últimos años [23–29]. Este criterio se basa en que los UEs puedan conectarse a las picoceldas, incluso cuando la picocelda no es el nodo que proporciona el nivel de potencia recibida más fuerte, expandiendo su área de cobertura. Los criterios de selección de nodo basados en este principio permiten que muchos más UEs se conecten a los nodos de baja potencia, descargando tráfico de la red macrocelular, y por lo tanto, incrementando las prestaciones del sistema.

El principio CRE se lleva a la práctica aplicando un bias positivo al nivel de RSRP de las picoceldas, tal y como se representa en la Figura 3.3. No obstante, aunque el criterio CRE permite incrementar el número de pUEs, es importante tener en cuenta que los usuarios localizados en la región extendida (región representada en color verde) reciben niveles de potencia más fuertes de la macrocelda, que de la picocelda que les da servicio. Por lo tanto, los esquemas de coordinación de interferencias adquieren todavía una mayor importancia, ya que, si se quieren garantizar unas condiciones de interferencia adecuadas a los pUEs localizados en las regiones extendidas, será necesario gestionar la interferencia cross-layer adecuadamente. Además, la aplicación de un valor de bias adecuado será también importante para evitar la degradación de prestaciones de los pUEs de las regiones extendidas, ya que valores de bias demasiado altos pueden provocar que estos pUEs observen niveles de SINR excesivamente bajos.

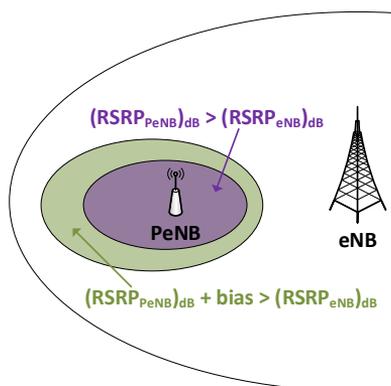


Figura 3.3: Criterio de selección de nodo CRE

En [23, 24] evalúan la aplicación del criterio de selección de nodo CRE, considerando un escenario formado por una macrocelda, sobre la que se despliegan varias picoceldas de forma aleatoria. Al estar formado el escenario por un único eNB, la propuesta no tiene en cuenta la ICI proveniente de los eNBs vecinos, ni un esquema de ICIC a nivel de eNB. Respecto al reparto de recursos entre ambas capas de la red, consideran que tanto el eNB, como los PeNBs, pueden asignar a sus UEs en todo el ancho de banda disponible en la red. Hay que tener en cuenta que los pUEs que se encuentran en las regiones extendidas reciben mayores niveles de potencia del eNB que de la picocelda que les da servicio, y además, esta diferencia es mayor a medida que se considera un valor de bias más alto. Por lo tanto, con el objetivo de reducir la interferencia sufrida por los pUEs ubicados en las regiones extendidas, los autores proponen que el eNB reduzca su potencia de transmisión en los RBs que son asignados por los PeNBs a los pUEs de las regiones extendidas. La propuesta considera que las picoceldas informen a la macrocelda de los RBs que son asignados a los pUEs de las regiones extendidas. De esta forma, cuando la macrocelda realiza la asignación de recursos frecuenciales a sus mUEs tiene en cuenta estos RBs, limitando la potencia transmitida en ellos. Estos recursos pueden ser asignados a mUEs que se encuentren cerca del eNB, o a mUEs con requisitos de tráfico bajos, ya que en estos mUEs son los que tendrán una menor demanda de potencia. Por lo tanto, la coordinación entre eNB y los PeNBs que se despliegan sobre su área de cobertura se realiza en potencia. Sin embargo, no existe una coordinación para proporcionar al resto de pUEs ciertos recursos donde los niveles interferentes recibidos del eNB sean menores. Es cierto que estos pUEs se encuentran más cerca de su PeNB y que por lo tanto están más protegidos frente a la interferencia, sin embargo, la elevada potencia de transmisión de los eNBs puede limitar sus prestaciones si no se aplica ningún tipo de coordinación.

En [25] los autores consideran un escenario formado por una red macrocelular, sobre las que se despliegan cuatro picoceldas en las zonas exteriores de cada una de las macroceldas. No consideran un esquema de ICIC a nivel de eNB que permitiría reducir la ICI, especialmente para los UEs de los bordes de las celdas. En este trabajo evalúan la aplicación del criterio de selección de nodo CRE, considerando diferentes valores de bias, y con el objetivo de mejorar los niveles de SINR observados por los pUEs de las regiones extendidas, analizan tres esquemas diferentes de reparto de recursos frecuenciales entre ambas capas de la red. Uno de los esquemas consiste en que tanto el eNB, como los PeNBs que se despliegan sobre su cobertura, reutilicen completamente todo el ancho de banda del sistema (Figura 3.4(a)). Sin embargo, esta reutilización completa, sin aplicar ningún tipo de coordinación entre ambos tipos de nodos, provoca que los niveles de SINR observados por los pUEs sean bajos, especialmente para los pUEs de las regiones extendidas, y agravándose la situación a medida que se aumenta el valor del bias. La segunda estrategia que consideran es la opuesta, es decir, un reparto ortogonal entre ambas capas de la red, que permite eliminar la interferencia cross-layer prácticamente en su totalidad (Figura 3.4(b)). Sin embargo, aunque esta estrategia permita mejorar significativamente los niveles de SINR de los UEs, la menor disponibilidad de recursos tanto en los eNBs, como en los PeNBs, reduce las prestaciones del sistema. Como tercer esquema plantean una estrategia intermedia, que consiste en que las picoceldas empleen todo el ancho de banda disponible, mientras que los eNBs solo acceden a la mitad del espectro (Figura 3.4(c)). Esta estrategia permite garantizar a las picoceldas recursos frecuenciales sin interferencia cross-layer, permitiendo mejorar las prestaciones de los pUEs, y en especial las de los pUEs de las regiones extendidas. Sin embargo, al limitar los recursos disponibles en los eNBs, se reducen significativamente las prestaciones de los mUEs, y por lo tanto, las prestaciones globales de la red.

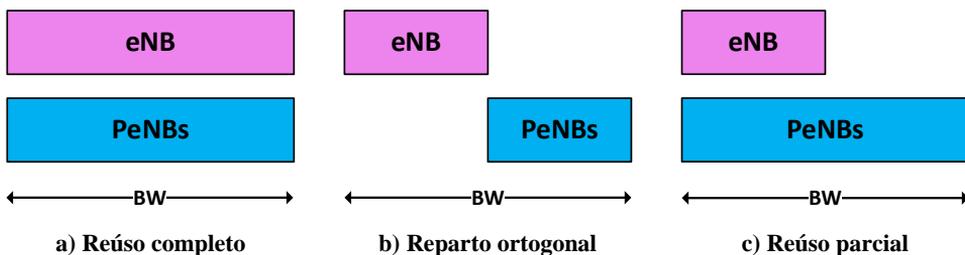


Figura 3.4: Propuestas de reparto de recursos frecuenciales entre ambas capas

Además de estos tres esquemas de reparto de recursos frecuenciales, los autores proponen coordinar la interferencia también en el dominio temporal, implementando la técnica ABS (Almost Blank Subframe) considerada por el 3GPP [30]. Cuando se emplea esta técnica, las subtramas se configuran como

subtramas normales, o como subtramas protegidas. En las subtramas normales, tanto los eNBs, como los nodos de baja potencia, transmiten a sus UEs de forma convencional. Sin embargo, en las subtramas protegidas (ABSs), solo se asignan a los UEs conectados a los nodos de baja potencia. De tal forma, que en estas subtramas los eNBs únicamente transmiten las señales de referencia (CRS: Cell specific Reference Signal), por lo que la interferencia recibida por los pUEs en este tipo de subtrama se mitiga en su mayor parte, tanto en los canales de control (PDCCHs: Physical Downlink Control Channels), como en los canales de datos (PDSCHs: Physical Downlink Shared Channels). El eNB y los PeNBs desplegados sobre su área de cobertura deben estar sincronizados a nivel de subtrama, obteniéndose mejores resultados si el resto de eNBs de la red también están sincronizados, o al menos los eNBs vecinos, especialmente si los PeNBs están desplegados en las zonas exteriores de las celdas. La técnica ABS se ha considerado en la literatura [25–29] para reducir la interferencia cross-layer sufrida por los pUEs de las regiones extendidas.

Con la implementación de la técnica ABS, los autores de [25] consiguen reducir la interferencia cross-layer sufrida por los pUEs. Sin embargo, las prestaciones de los mUEs se ven reducidas, ya que en las ABSs no pueden ser asignados, reduciéndose los recursos efectivos disponibles. Por lo tanto, de entre los tres esquemas de coordinación frecuencial propuestos, el esquema que permite emplear todo el ancho de banda, tanto en el eNB, como en los PeNBs, es el que permite limitar la reducción de prestaciones de los mUEs. Ya que, a pesar de que uno de los objetivos de los despliegues de picoceldas es que sean capaces de descargar tráfico de los eNBs, reducir los recursos disponibles en los eNBs, ya sea en frecuencia, o en tiempo, puede comprometer la capacidad de los eNBs, que seguirán teniendo que dar servicio a un número elevado de UEs. Por lo tanto, si los mUEs se encuentran limitados por no disponer de suficientes recursos, la ganancia potencial de los despliegues heterogéneos puede verse reducida.

Un reuso frecuencial completo entre eNB y PeNBs, junto con la aplicación del criterio de selección de nodo CRE y la implementación de la técnica ABS, es también la propuesta considerada en [26]. El escenario considerado es el despliegue de una macrocelda, sobre la que se despliega una picocelda de forma aleatoria. Por lo tanto, el estudio no tiene en cuenta la ICI recibida de macroceldas vecinas. La propuesta se centra en diseñar un algoritmo que permita definir el patrón ABS, al mismo tiempo que los pUEs son clasificados entre protegidos y no protegidos. El patrón ABS determina qué subtramas concretas son configuradas como subtramas protegidas (ABS) dentro de una trama. Por lo tanto, esta elección determina en gran medida la reducción de los recursos temporales disponibles en los eNBs para poder servir a sus mUEs, y al mismo tiempo, impacta en las prestaciones alcanzables por los pUEs de las regiones

extendidas. Los pUEs que sean clasificados como protegidos serán los únicos que podrán ser asignados en las ABSs, mientras que, por el contrario, los pUEs no protegidos serán los únicos que podrán ser asignados en las subtramas convencionales. El algoritmo propuesto compara para cada subtrama dentro de una trama el throughput global que alcanzaría la red si dicha subtrama se configura como normal, frente al que se alcanzaría si dicha subtrama se configura como ABS, con el objetivo de maximizar el throughput de la red. Además, el algoritmo también decide qué pUEs son clasificados como protegidos, y cuales como no protegidos, comparando el throughput que alcanzaría el pUE en cada caso, y teniendo como objetivo que la distribución de throughput entre pUEs sea equitativa. En cualquier caso, merece la pena destacar, que si no hay una sincronización del patrón ABS entre eNBs vecinos, la ICI degradará las prestaciones de los pUEs protegidos, especialmente si los PeNBs son desplegados en las zonas exteriores de las celdas.

La propuesta introducida en [27] es bastante similar, considerando un escenario formado por una macrocelda, y dos picoceldas desplegadas sobre su área de cobertura de forma aleatoria. No consideran un esquema de ICIC para reducir la interferencia proveniente de las celdas vecinas, y tanto el eNB, como los PeNBs, pueden asignar a sus UEs en todo el ancho de banda del sistema. Emplean el criterio de selección de nodo CRE, e implementan la técnica ABS para reducir la interferencia sufrida por los pUEs en las regiones extendidas. Proponen un algoritmo para ajustar el patrón ABS, de tal forma que buscan maximizar el throughput global de la red, al mismo tiempo que tratan de minimizar el descarte de paquetes de datos de UEs con tráfico GBR (Guaranteed Bit Rate). Para ello estiman la capacidad de transmisión de datos de cada nodo en ambos tipos de subtrama, considerando la estimación de la SINR observada por cada UE, analizando al mismo tiempo los datos urgentes que deberían recibir los UEs que cursan tráfico GBR, para aliviar su descarte de paquetes.

Las propuestas presentadas en [25–29] consideran la aplicación de la técnica ABS, junto con un reuso frecuencial completo entre eNB y PeNBs, limitando los recursos temporales a los que tienen acceso los usuarios conectados a los eNBs. Sin embargo, cabe esperar que los eNBs tengan que seguir siendo capaces de dar servicio a un número elevado de UEs, cubriendo áreas de cobertura más grandes. Por lo tanto, reducir los recursos disponibles en los eNBs, ya sea en tiempo, o en frecuencia, puede comprometer las prestaciones globales de la red. Además, estas propuestas no consideran un esquema de ICIC entre eNBs que permitiría reducir la interferencia generada entre celdas vecinas, además de posibilitar la coordinación de los recursos frecuenciales disponibles en los PeNBs, con los recursos empleados por los eNBs en las zonas en las que se despliegan los PeNBs, como la propuesta considerada en [19, 20].

En este capítulo nos centramos en proponer varios esquemas de coordinación de recursos frecuenciales entre eNBs y PeNBs, que aprovechan la ordenación en la asignación frecuencial de la subbanda interior del esquema FFRopa (subapartado 2.3.1), con el objetivo de proporcionar recursos a los PeNBs en los que la interferencia cross-layer es más baja. Además, también se considera la aplicación del criterio de selección de nodo CRE para aumentar el número de usuarios que permanecen conectados a los PeNBs, analizando diferentes valores bias para diferentes escenarios.

3.2 Modelo del sistema

Se consideran celdas con geometría hexagonal, y cada celda está compuesta por tres sectores, de tal forma que cada uno de ellos cubre un ángulo de 120° . En la Figura 3.5 se representan las dos configuraciones más comunes para la orientación de los sectores. Si los sectores se despliegan a 0° (Figura 3.5(a)), se evita la alineación de la dirección de máxima radiación entre sectores colindantes, pero sin embargo se provoca la aparición de una zona de interferencia extremadamente alta en las intersecciones entre los tres sectores de las celdas adyacentes (zona marcada con un círculo rojo). En el caso de aplicar esquemas de ICIC sin sectorización estática, la SINR que observarían los UEs de esas zonas serían muy bajas, degradándose las prestaciones de la red. Este problema puede evitarse si se orienta el azimut de los sectores como se muestran en la Figura 3.5(b). Con este despliegue se evita que coincida la orientación de las direcciones de máxima radiación de los sectores de las celdas adyacentes. Durante toda la tesis se considera únicamente el despliegue a 30° (Figura 3.5(b)), ya que ofrece mejores prestaciones a nivel global.

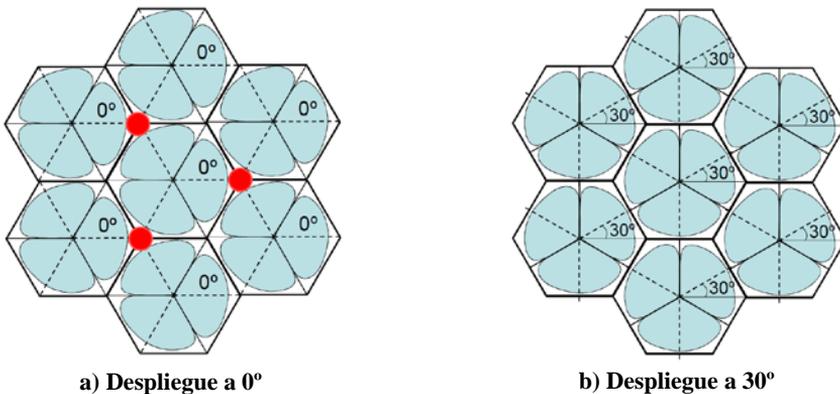


Figura 3.5: Configuraciones más comunes para el despliegue de sectores

En la Figura 3.6 se representa la configuración de despliegue de las picoceldas, representándose el eNB mediante una estrella azul y la picocelda

(PeNB) mediante un círculo negro. La estación base (eNB) se despliega en el centro de la celda, y en cada celda se despliega una picocelda (PeNB) en una posición (d, θ) , donde d representa la distancia entre la picocelda y el eNB, y θ representa el ángulo entre la dirección formada por el eNB y la picocelda, y la frontera entre los sectores A y C.

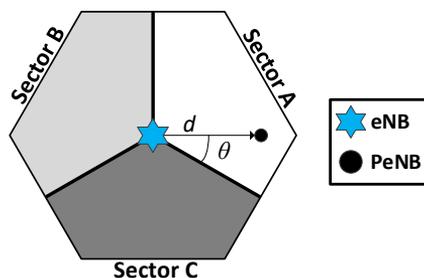


Figura 3.6: Configuración de despliegue de picoceldas

Siguiendo las recomendaciones para el desarrollo de LTE, y tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, los recursos frecuenciales del sistema se dividen en RBs, los cuales representan la asignación mínima de recursos. Se considera un ancho de banda del sistema de 5 MHz, con lo que se dispone de un total de 27 RBs.

3.3 Esquemas de ICIC y criterio de selección de nodo propuestos

En este apartado se describen las diferentes propuestas consideradas para la gestión de recursos radio y coordinación de interferencias para despliegues de picoceldas, así como el criterio de selección de nodo considerado. Debido a que las picoceldas son desplegadas dentro del área de cobertura de las macroceldas y dado que se pretende emplear las mismas bandas frecuenciales, es importante diseñar un esquema de coordinación de interferencias entre PeNBs y eNBs adecuado. En este proceso de diseño puede observarse un compromiso entre maximizar el reuso frecuencial y minimizar la interferencia cross-layer generada. Como se ha visto en la revisión del estado del arte, en la literatura se han propuesto diferentes tipos de soluciones, como por ejemplo, una de las consideradas en [25], que se basa en un reparto ortogonal de recursos entre ambas capas de la red. Sin embargo, debido a que el espectro frecuencial disponible es muy escaso, además de muy costoso económicamente, este tipo de soluciones no permiten aprovechar al máximo los recursos frecuenciales. Por ello las propuestas consideradas en este capítulo se basan en un reuso parcial de los recursos entre ambas capas.

Los esquemas propuestos en [16–18] sí que consideran un cierto reuso frecuencial entre ambas capas de la red, sin embargo, no consideran un esquema de ICIC entre macroceldas. La aplicación de un esquema de ICIC a nivel de eNB, además de mejorar las condiciones de interferencia del sistema, permite coordinar los recursos empleados por las macroceldas, con los empleados por las picoceldas, pudiendo ofrecer a las picoceldas un conjunto de recursos con un nivel de interferencia menor y más estable. Por ello, las propuestas de este capítulo se centran en coordinar los recursos asignados a las picoceldas, con el esquema de ICIC aplicado en la macrocelda. Los esquemas propuestos se basan en la aplicación del esquema FFR_o como esquema de ICIC entre macroceldas, puesto que este esquema ofrece mejores prestaciones que el esquema FFR convencional.

Además de ser necesario considerar un esquema de coordinación de interferencias entre eNBs y PeNBs, el criterio de selección de nodo también tiene un gran impacto en las prestaciones globales del sistema. Por otra parte, se espera que las picoceldas sean capaces de descargar parte de los usuarios de las macroceldas, especialmente en zonas con alta densidad de usuarios. Si se considera un esquema convencional, se podría esperar que el usuario se conectara al nodo que le ofrece un mayor nivel de RSRP o un mayor nivel de SINR. Sin embargo, debido a la diferencia en la potencia de transmisión entre eNBs y PeNBs, los usuarios tenderían a conectarse a los eNBs, reduciendo las ventajas del despliegue de picoceldas. Por ello, tal y como se ha visto en la revisión del estado del arte, es necesario considerar un criterio de selección de nodo adaptado al despliegue de picoceldas, apostando por un criterio basado en la estrategia CRE.

3.3.1 Esquemas de ICIC para despliegues de picoceldas

El principio básico detrás de las propuestas es tratar de asignar a las picoceldas aquellos recursos frecuenciales que no son empleados por la macrocelda en la zona en la que son desplegadas, con el objetivo de proporcionar a las picoceldas recursos con niveles interferentes adecuados. Se consideran como punto de partida los esquemas de ICIC para redes macrocelulares FFR y FFR_o. En concreto se contempla el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior, y se considera a modo de referencia, ya que en esta tesis se apuesta por el esquema FFR_o, debido a que las mejoras que incorpora respecto al esquema FFR convencional permiten reducir la variabilidad de la ICI y mejorar las prestaciones de la red. Para ambos esquemas se puede analizar qué recursos frecuenciales pueden ser más interesantes para las picoceldas.

Considerando en primer lugar que el esquema de ICIC seleccionado a nivel macrocelular es el esquema FFR, si se analiza la subbanda interior, es imposible diferenciar un conjunto de RBs en los que las picoceldas observen mejores condiciones de interferencia. Esto es debido a que, como no se aplica ninguna restricción en la asignación de la subbanda interior, un RB puede ser asignado por cualquiera de los sectores de la celda. Respecto a la subbanda exterior, se aplica sectorización estricta, por lo que pueden evitarse los RBs de la subbanda exterior asignados por el propio sector en el que está desplegada la picocelda.

Si se aplica el esquema FFR_{opa}, se puede aprovechar el ordenamiento en la asignación de recursos que se lleva a cabo en la subbanda interior, para seleccionar prioritariamente aquellos recursos frecuenciales preasignados a los otros dos sectores restantes de la celda, en los que no se encuentra desplegada la picocelda. De esta forma se evitarían los RBs preasignados al propio sector en el que está desplegada la picocelda, pudiendo ofrecer a las picoceldas RBs en los que los niveles interferentes son más bajos. Por lo tanto, una ventaja adicional del esquema FFR_{opa} es que, gracias a preasignar un conjunto de los RBs a cada uno de los sectores, se pueden coordinar los recursos frecuenciales asignados por las macroceldas, con los asignados por las picoceldas, con el objetivo de reducir la interferencia cross-layer y mejorar las prestaciones de la red. Respecto a la subbanda exterior, se aplica sectorización estricta al igual que en el esquema FFR, por lo que pueden evitarse los RBs de la subbanda exterior asignados por el propio sector en el que está desplegada la picocelda.

Como se ha comentado, si asumimos el uso de un ancho de banda de 5MHz, se dispone de un total de 27 RBs. De ellos, se consideran 18 RBs como subbanda interior, de los cuales se preasignan a cada sector 6 RBs, mientras que los 9 RBs restantes forman la subbanda exterior, asignando 3 RBs a cada uno de los sectores (Figura 3.7(a)). Hay que tener en cuenta que si se trata de asignar a las picoceldas los recursos frecuenciales que no son asignados por el propio sector en el que está desplegada, esos recursos serán potencialmente asignados por los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, que si se toma como referencia la picocelda de la celda 1, serían el sector C de la celda 2 y el sector B de la celda 3. Si en primer lugar se analiza la subbanda interior, debido a la flexibilidad que se proporciona en su asignación, aunque se planifiquen para la picocelda RBs pertenecientes a las subbandas preasignadas a los dos sectores restantes de la celda, estos RBs pueden ser asignados por el propio sector, incrementándose significativamente la interferencia cross-layer recibida, especialmente si la picocelda está desplegada cerca del eNB. Además, estos RBs también pueden ser asignados por los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes de forma simultánea, incrementándose también la interferencia cross-layer, y teniendo más impacto en este caso si la picocelda está desplegada en la zona exterior de la celda.

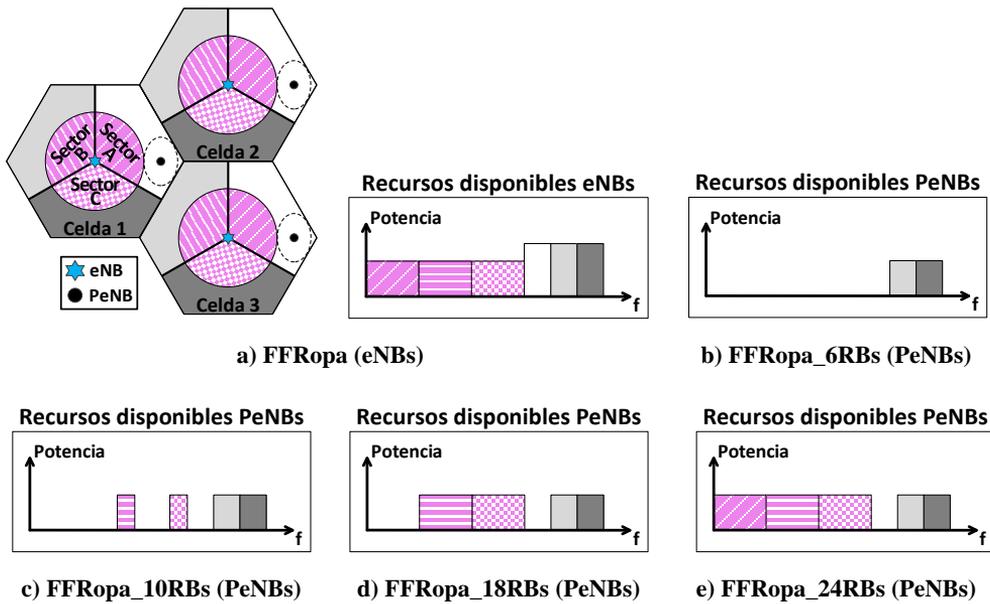


Figura 3.7: Esquemas de coordinación de interferencias FFRopa_xRBs

En el caso de la subbanda exterior, aunque es evidente que la interferencia que recibiría un pUE en un RB que pertenece a la subbanda exterior de uno de los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes es más alta que si se tratase de un RB de la subbanda interior, la sectorización estricta evita que estos RBs sean asignados por el propio sector en el que está desplegada la picocelda, así como evita que estos RBs sean asignados de forma simultánea por los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Por lo tanto, los RBs de la subbanda exterior ofrecen una menor variabilidad de la interferencia cross-layer recibida tanto de la propia macrocelda en la que se despliega la picocelda, como de las macroceldas adyacentes. Por ello, el primer esquema de ICIC que se propone es el esquema FFRopa_6RBs (Figura 3.7(b)), en el que a cada picocelda se le asignan los 6 RBs pertenecientes a las subbandas exteriores de los sectores B y C.

Con el objetivo de incrementar el reuso frecuencial proporcionando recursos adicionales a las picoceldas, el siguiente paso es considerar la subbanda interior. El primer conjunto de RBs a considerar son las subbandas preasignadas a los dos sectores restantes de la celda (sectores B y C), ya que de esta forma se evitan los RBs que prioritariamente serán asignados por el propio sector en el que está desplegada la picocelda (sector A), minimizando la interferencia cross-layer generada. No obstante, estos RBs pueden ser asignados en cualquier momento por el propio sector A, por lo que en el siguiente esquema de ICIC que se propone (Figura 3.7(c)) se adopta una estrategia conservadora. Esta estrategia

consiste en seleccionar para cada picocelda los dos RBs de la subbanda interior preasignada a cada uno de los dos sectores restantes, que según el ordenamiento seguido en FFRopa (Figura 2.5 y Figura 2.6), serán empleados en último lugar. De esta forma, en situaciones donde la carga del sistema no es muy alta, estos RBs pueden quedarse sin asignar en la propia celda en la que se despliega la picocelda, reduciendo el nivel de interferencia cross-layer que reciben los pUEs, y reduciendo la probabilidad de que esos RBs sean asignados por el propio sector A. Por lo tanto, se añaden cuatro RBs a los recursos disponibles de las picoceldas, haciendo un total de 10 RBs (FFRopa_10RBs). Merece la pena destacar, que tal y como se representa en la Figura 2.6, las celdas adyacentes comienzan a asignar los recursos frecuenciales en diferentes puntos de cada una de las subbandas interiores, con el objetivo de minimizar la ICI del sistema en condiciones de baja carga. Por lo tanto, a cada picocelda se le asignan los dos RBs de la subbanda interior que se emplean en último lugar, de acuerdo al orden particular de su celda.

Dando un paso más para incrementar el reuso frecuencial, el siguiente esquema de ICIC que se propone es el esquema FFRopa_18RBs (Figura 3.7(d)), en el que las picoceldas pueden asignar toda la subbanda interior preasignada a los dos sectores restantes de su propia celda. A pesar de que la interferencia cross-layer puede ser más variable en estos RBs adicionales, y de que la potencia transmitida por RB de las picoceldas se reduce al incrementar los recursos disponibles, será necesario comprobar si la mayor disponibilidad de RBs permite compensar ambos aspectos. Por lo tanto, en el esquema FFRopa_18RBs cada picocelda dispone de un total de 18 RBs para sus pUEs: 12 RBs de las subbandas interiores preasignadas a los sectores B y C, más 6 RBs de las subbandas exteriores de los sectores B y C.

Si se aprovecha que la potencia de transmisión de los eNBs es más baja en la subbanda interior, se puede proponer un reuso frecuencial todavía más agresivo, de tal forma que se añade a los recursos disponibles de las picoceldas toda la subbanda interior preasignada a su propio sector (sector A). Con esta estrategia, cada picocelda tendría un total de 24 RBs para asignar a sus pUEs, tal y como se refleja en la Figura 3.7(e) (FFRopa_24RBs). Por lo tanto, las picoceldas podrían reutilizar todo el ancho de banda disponible en el sistema, salvo la subbanda exterior de su propio sector, ya que la potencia de transmisión en esta subbanda es más alta, y los niveles de interferencia que sufrirían los pUEs serían excesivos.

No obstante, aunque la potencia de transmisión en la subbanda interior sea más baja, los niveles de interferencia que sufrirán los pUEs en los RBs pertenecientes a la subbanda interior preasignada al propio sector A serán elevados. Sin embargo, el scheduling frecuencial de los PeNBs tratará de asignar

los RBs que son empleados por el propio sector a los pUEs que se encuentran ubicados cerca de las picoceldas, ya que estos pUEs observan buenas condiciones de canal y están más protegidos frente a la interferencia. Por el contrario, el scheduling frecuencial tratará de asignar los RBs que son empleados por los dos sectores restantes de la celda, a aquellos pUEs que se encuentran más alejados de las picoceldas, con el objetivo de ofrecerles recursos frecuenciales con menores niveles de interferencia para contrarrestar las mayores pérdidas de propagación. En cualquier caso, será necesario comprobar si la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales que ofrece el esquema FFRopa_24RBs permite compensar los elevados niveles de interferencia que observarán los pUEs en los RBs adicionales, así como la reducción en la potencia transmitida por RB debida al aumento de los RBs disponibles.

3.3.2 Criterio de selección de nodo

En esta tesis se ha optado por revisar el concepto CRE, que tal y como se ha visto, es una propuesta bastante aceptada en la literatura para extender el área de cobertura de las picoceldas. De esta forma, un UE se conecta a una picocelda si al añadir el bias a la RSRP de la picocelda se obtiene un valor superior a la RSRP del eNB, tal y como se expresa en la ecuación (3.6).

$$(RSRP_{PeNB})_{dB} + (bias)_{dB} > (RSRP_{eNB})_{dB} \quad (3.6)$$

La aplicación de un valor elevado de bias permitiría descargar una mayor cantidad de UEs de los eNBs a las picoceldas, sin embargo, un bias demasiado agresivo puede degradar notablemente las prestaciones del sistema, ya que los pUEs que se encuentran alejados de las picoceldas pueden llegar a observar valores de SINR de su PeNB excesivamente bajos. Por otro lado, un valor de bias demasiado bajo puede provocar que solo unos pocos UEs se conecten a los PeNBs, de tal forma que no se aprovechan todo lo posible los recursos frecuenciales disponibles en los PeNBs, mientras que los UEs conectados a los eNBs pueden sufrir de escasez de recursos. Por lo tanto, será necesario escoger el valor de bias de forma cuidadosa, con el objetivo de maximizar la capacidad de la red.

3.4 Condiciones de evaluación

El modelo de despliegue de red que se considera en la tesis se basa en un clúster compuesto por *NBS* celdas con geometría hexagonal. Con el objetivo de evitar los efectos de borde al no considerar una red infinita, se aplica la técnica wrap-around, que se basa en replicar virtualmente el clúster de *NBS* celdas de forma circular. De esta forma, las celdas que en el clúster original están situadas

en extremos opuestos, y por lo tanto, incorreladas por distancia, se consideran ahora celdas vecinas, emulándose una red de grandes dimensiones a través de un conjunto reducido de celdas simuladas (*NBS*). En la Figura 3.8 puede verse el ejemplo de aplicar esta técnica sobre un clúster de 19 celdas. Si se toma como ejemplo la celda 8, la técnica wrap-around hace que esta celda aparezca como vecina de las celdas 13 y 14, cuando en el clúster original se encuentran en extremos opuestos.

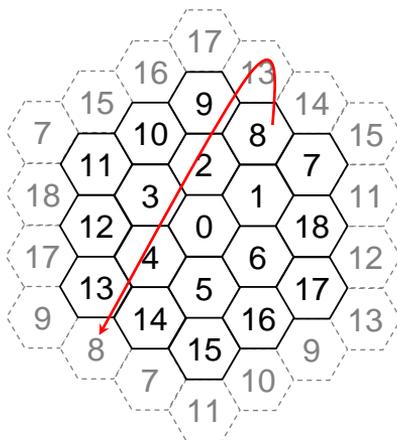


Figura 3.8: Ejemplo de la técnica wrap-around

Con el objetivo de poder evaluar las prestaciones ofrecidas por los esquemas de coordinación de interferencias que se han propuesto a lo largo del área de cobertura de la celda, se definen tres regiones concéntricas con la misma superficie, a las que se denominan zonas. En la Figura 3.9 se representa esta división del área de cobertura por zonas, siendo la zona 0 la zona más cercana al eNB (zona roja), mientras que la zona 2 es la zona más exterior de la celda (zona azul).

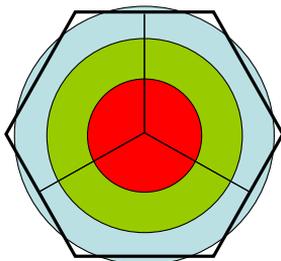


Figura 3.9: División del área de cobertura de la celda por zonas

Respecto al entramado de la comunicación, se asume la estructura planteada en el estándar LTE-A para el esquema FDD [31], que se ha adelantado en el apartado 2.1. Por lo tanto, la comunicación en el enlace descendente se organiza en tramas de duración $T_f = 10$ ms, las cuales a su vez están formadas por 10

subtramas de duración $T_{sf} = 1$ ms. Las subtramas constituyen la unidad mínima de transmisión con sentido en sí misma, y cada una de estas subtramas se divide en 2 slots ($T_{slot} = 0.5$ ms). 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 DL y del UL), 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). En la parte izquierda de la Figura 3.10 se muestra el mapeado utilizado en el enlace descendente para los diferentes tipos de canales. Este mapeado se corresponde con el propuesto en LTE para la configuración por defecto, que considera dos antenas transmisoras y el prefijo cíclico (CP) de duración normal.

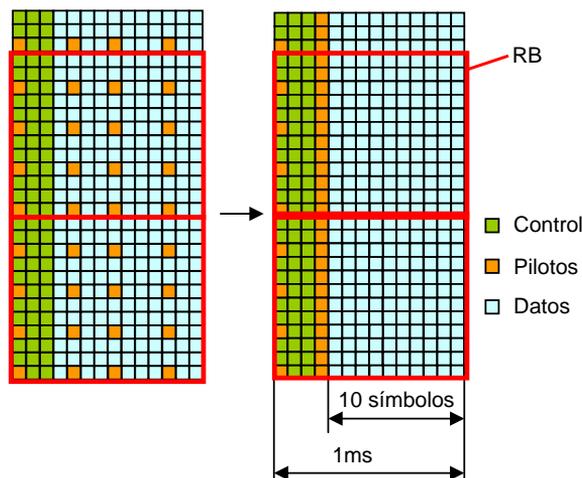


Figura 3.10: Distribución equivalente del entramado de la comunicación

Como se ha comentado, los recursos frecuenciales del canal de datos se dividen en RBs siguiendo las recomendaciones para el desarrollo de LTE. En concreto, se ha definido el tamaño del RB como 12 subportadoras (N_{SC}) durante una subtrama completa. Por lo tanto, considerando el prefijo cíclico normal, y una separación entre subportadoras de $\Delta f = 15$ Hz, cada slot está formado por 7 símbolos OFDM, de tal forma que cada RB incluye 14 símbolos OFDM (N_T) consecutivos. Tal y como se ha visto en la parte izquierda de la Figura 3.10, señalización y control están multiplexados en tiempo a nivel de subtrama. No obstante, si se considera un tamaño fijo para el canal de control de tres símbolos OFDM, y se considera que las subportadoras piloto distribuidas a lo largo del canal de datos equivaldrían a un símbolo completo si se agruparan todas, se obtiene la distribución equivalente de subportadoras mostrada en la parte derecha de la Figura 3.10. Por lo tanto, teniendo en cuenta estas consideraciones, el tamaño efectivo de un RB para la transmisión de datos es de 120 símbolos OFDM, ya que se disponen de 12 subportadoras durante 10 símbolos. Se aplica

la misma potencia de transmisión y el mismo MCS a todas las subportadoras que pertenecen a un mismo RB, de acuerdo con las decisiones de scheduling realizadas en cada subtrama.

Las entidades asociadas con la gestión de recursos radio, incluyendo la asignación de potencia, la asignación de recursos en tiempo y frecuencia y la selección adaptativa del MCS, están localizadas en los eNBs y los PeNBs. Las decisiones de scheduling se toman de forma independiente en cada nodo cada TTI. Tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, la asignación de recursos se trata como un problema multidimensional. De tal forma que, en primer lugar, el esquema de ICIC es el que determina qué parte de los recursos frecuenciales pueden ser asignados en cada nodo, en cada sector o en cada zona. Posteriormente, es el scheduler el que asigna los recursos a cada UE, aplicándose sus dos componentes de forma secuencial. En primer lugar, el scheduler temporal asigna un índice de prioridad a cada usuario. A continuación, el scheduler frecuencial selecciona los recursos (RB y potencia de transmisión) para cada usuario, priorizando a los usuarios con mayor índice de prioridad, además de seleccionar la tasa permitida (MCS) de acuerdo con la información disponible sobre el estado del canal de cada usuario.

3.4.1 Modelado del nivel físico y de enlace

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

De esta forma, para decidir si un bloque de datos se ha recibido correctamente o si contenía errores y debe ser retransmitido, se trabaja con

curvas de BLER frente a la SINR promedio para cada MCS. Por lo tanto, en recepción se lleva a cabo el siguiente proceso:

- En primer lugar, se calcula el valor promedio de la SINR recibida en el RB, que se basa en los valores promedio de potencia recibida (útil, interferencia y ruido) en el RB por el usuario en cuestión.
- En segundo lugar, se obtiene el valor promedio de BLER para ese valor de SINR (P_e), a través de la curva de nivel de enlace.
- Por último, se genera una variable aleatoria uniforme entre 0 y 1, de tal forma que si su valor es menor que P_e se considera que los datos transmitidos en ese RB contienen errores, y por lo tanto tienen que ser retransmitidos. Por el contrario, si el valor de la variable aleatoria es superior a P_e se considera que los datos han sido recibidos correctamente.

Este método está ampliamente extendido para efectuar evaluaciones a nivel de sistema y ha sido debidamente verificado, obteniéndose una diferencia despreciable con respecto a simulaciones con un modelado explícito de la capa física, y requiriendo un tiempo de computación notablemente inferior. En la Tabla 3.1 se recopilan los MCSs considerados en las simulaciones. Se incluyen los valores de SINR requeridos, obtenidos para lograr una tasa de BLER objetivo del 1%. Además, también se incluye la tasa de datos útiles por RB que proporciona cada MCS.

Índice de MCS	Modulación	Tasa de código	SINR umbral [dB]	Bits de información por RB
0	QPSK	1/2	10.2	120
1		3/4	14.0	180
2	16QAM	1/2	17.5	240
3		3/4	21.4	360
4	64QAM	2/3	27.4	480
5		3/4	29.5	540

Tabla 3.1: MCSs considerados

3.4.1.1 Modelado explícito de la interferencia

Dado que en las redes celulares OFDMA la interferencia inter-celular e inter-sector son los factores dominantes (varios órdenes de magnitud por encima del ruido), su impacto en las prestaciones ofrecidas por el sistema es determinante. Es por esto que para realizar la evaluación de prestaciones se evita el uso de modelos de interferencia, y se emula de forma explícita la transmisión de señal por parte de todos los nodos del sistema (eNBs y PeNBs). Puesto que la interferencia experimentada por un usuario se debe en gran medida a los nodos

más próximos, se considera únicamente la contribución correspondiente a los eNBs y PeNBs de la propia celda en la que se encuentra el UE (coloreada en gris claro en la Figura 3.11) y de las celdas del primer anillo interferente (coloreadas en gris oscuro en la Figura 3.11). De esta forma, cada usuario dispone de la señal recibida de cada uno de los nodos vecinos, considerándose las pérdidas de propagación para todos los enlaces. Por lo tanto, para cada usuario se obtiene la interferencia que sufre sumando el valor de potencia promedio que recibe en cada RB de cada uno de los nodos interferentes.

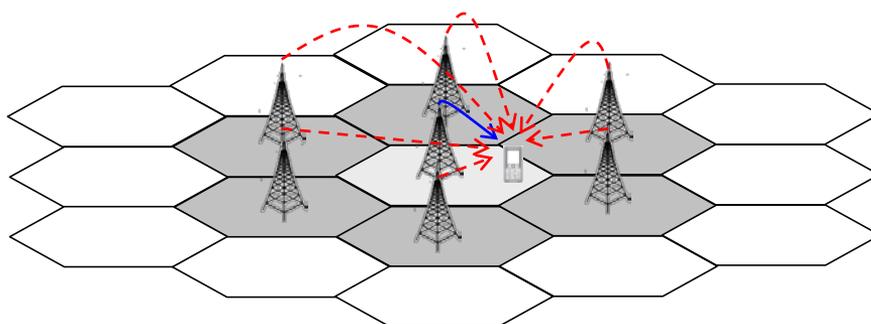


Figura 3.11: Transmisión explícita de la interferencia

3.4.2 Modelado del canal radio

En las redes móviles, uno de los aspectos que limita la capacidad de la red es el canal radio, ya que se trata de un canal especialmente agresivo y con una fuerte atenuación para las frecuencias elevadas en las que normalmente trabajan este tipo de sistemas. Por lo tanto, para poder evaluar de forma realista las diferentes propuestas contempladas en la tesis, es necesario considerar un modelo realista del canal radio, que sea capaz de modelar todos sus efectos. En concreto, el modelo de canal considerado a lo largo de esta tesis contempla tres componentes fundamentales, como son las pérdidas de propagación con la distancia, los desvanecimientos lentos y los desvanecimientos rápidos.

3.4.2.1 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 [32], para modelar las pérdidas de propagación se emplea el modelo mostrado en la ecuación (3.7). Este modelo solo depende de la distancia entre el transmisor y el receptor (d , expresada en Km) y es un modelo utilizado con frecuencia en la evaluación de propuestas para los sistemas de banda ancha, y en particular, para sistemas LTE.

$$L_p = \alpha + \alpha_d \cdot \log_{10}(d [Km]) \quad (3.7)$$

3.4.2.2 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 mediante una variable aleatoria (ξ_k) de distribución lognormal con desviación típica σ . En una situación real, los desvanecimientos lentos debidos a los grandes obstáculos no varían en exceso entre dos posiciones cercanas, es decir, existe un cierto grado de correlación espacial en el shadowing. Por lo tanto, para tener en cuenta este aspecto se considera una distancia de correlación (d_{cor}), que puede definirse como la distancia entre dos puntos que presentan valores de shadowing incorrelados en un escenario dado.

Además de esta correlación a pequeña escala, existe también una correlación macroscópica entre las distintas celdas del sistema, ya que los grandes obstáculos que puede encontrarse la señal entre un usuario y los nodos cercanos de su entorno son por lo general similares. Para modelar esta correlación se considera una segunda variable aleatoria (ζ) de distribución lognormal con desviación típica σ , que es común a todos los caminos de propagación de la señal hacia un mismo usuario. Por lo tanto, el valor final de shadowing que se considera en un camino de propagación determinado (ζ_k) se obtiene como una ponderación de las dos variables lognormales, es decir, de la común a todos los caminos y de la propia de cada camino, tal y como se muestra en la ecuación (3.8). 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 nodos.

$$\zeta_k (dB) = a \cdot \xi_k (dB) + b \cdot \zeta (dB), \text{ con } a^2 + b^2 = 1 \quad (3.8)$$

3.4.2.3 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. 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 de forma conjunta el efecto de la propagación multicamino y de la movilidad, la potencia de cada uno de los rayos se genera mediante una estadística Rayleigh con el valor promedio dado. En la tesis se ha considerado un modelo que depende de la velocidad de desplazamiento de los usuarios, y que

es el modelo propuesto por el 3GPP para el desarrollo de LTE [33]. En la Tabla 3.2 se recoge el modelo considerando una velocidad de desplazamiento de los usuarios de 3 km/h.

Retardo del camino [ns]	Potencia relativa [dB]
0	0.0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0
190	-17.2
410	-20.8

Tabla 3.2: Pedestrian-A extendido (3 km/h)

Además del efecto en la potencia de señal debida a la suma de los distintos rayos que conforman el canal de propagación, es importante destacar que las réplicas de la señal pueden provocar interferencia inter-simbólica cuando el retardo del rayo es superior a la duración del prefijo cíclico. No obstante, en las simulaciones que se han llevado a cabo en esta tesis se asume que el prefijo cíclico es capaz de absorber todas las réplicas del canal sin que exista interferencia inter-simbólica.

Por otro lado, 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. Por lo tanto, se puede definir un tiempo de coherencia del canal τ_c , que indica el tiempo que ha de transcurrir hasta que los desvanecimientos rápidos pueden considerarse incorrelados. De las diferentes relaciones que pueden encontrarse en la literatura, se considera la mostrada en la ecuación (3.9), en la que f_D es la frecuencia Doppler del usuario, obtenida teniendo en cuenta su velocidad media de desplazamiento (v), la velocidad de la luz (c) y la frecuencia portadora (f_c). Una vez que se fija 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 [34].

$$\tau_c = \frac{0.423}{f_D} = \frac{0.423}{\frac{v}{c} f_c} \quad (3.9)$$

3.4.3 Modelado de los procedimientos de monitorización del canal

Una de las principales funciones que llevan a cabo los terminales móviles es realizar las medidas de calidad del enlace y generar los correspondientes CQIs. Posteriormente los CQIs son usados por el nodo que da servicio al terminal para tomar las decisiones de asignación de recursos y adaptar el MCS utilizado. Estos informes sobre el estado del canal están constituidos por un valor promedio de calidad del enlace para cada RB, asumiendo que se pueden estimar idealmente las pérdidas del canal y la potencia interferente a partir de la señal recibida. Como medida de la calidad del canal se emplea la relación canal a interferencia y ruido que observa el UE u ($CINR_{est,u}^f$), estimada como se muestra en la ecuación (3.10), donde h_u^f es la ganancia promedio del canal en el RB f , I_u^f es la potencia interferente promedio por portadora en el RB f y N_u^f es la potencia promedio del ruido AWGN.

$$CINR_{est,u}^f = \frac{h_u^f}{I_u^f + N_u^f} \quad (3.10)$$

Aunque se asume que es posible estimar idealmente las pérdidas del canal y la potencia interferente a partir de la señal recibida, el sistema no asume un modelado ideal de canal. En concreto, para la generación de los informes CQIs se ha considerado el esquema mostrado en la Figura 3.12, de tal forma que los usuarios promedian la CINR observada para cada RB durante los últimos W_{CQI} ms, generando un nuevo CQI cada ΔT_{CQI} ms. Cada vez que se obtiene un nuevo CQI transcurren Δ_{CQI} ms hasta que este CQI está disponible en el scheduler del nodo que da servicio al UE. Este intervalo Δ_{CQI} permite modelar el retardo introducido por los procesos de transmisión, recepción y procesamiento del mensaje CQI. Por lo tanto, se modela de forma explícita los errores en la estimación de canal y de la interferencia, debidos a que el nodo que da servicio al UE no dispone en el momento de realizar la asignación de recursos de las condiciones exactas del canal.

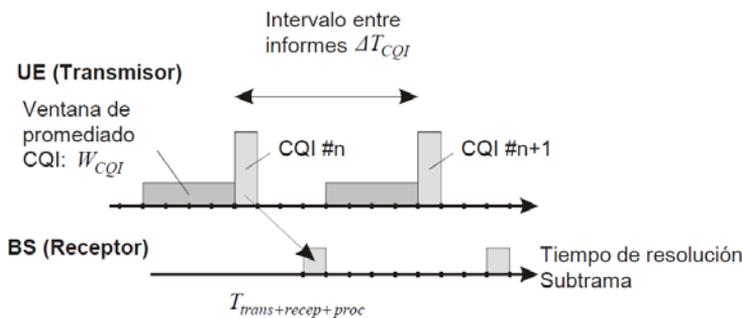


Figura 3.12: Esquema de envío de CQIs

Cuando las condiciones observadas por los usuarios son muy estables, el mecanismo de CQI permite seguir con precisión la evolución del canal, y por lo tanto, se puede realizar una asignación de recursos frecuenciales eficiente. Sin embargo, cuando el canal presenta fuertes variaciones a corto plazo, como por ejemplo debido a altas velocidades de desplazamiento, o debido a condiciones de interferencia muy cambiantes, los CQIs pueden no reflejar las condiciones de canal futuras en las que se realizará la transmisión de datos de forma fiable. Esta situación reduce el rendimiento de los algoritmos de asignación de recursos, ya que, si las condiciones de canal reales se diferencian demasiado de las condiciones estimadas, se produce un aumento de la BLER al cometerse 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 de recursos pueden controlar es la interferencia. Por lo tanto, un algoritmo que permita estabilizar la potencia transmitida en subtramas sucesivas ofrecerá unas condiciones de interferencia más estables, reduciendo la variación de las condiciones de canal observadas por los usuarios.

3.4.4 Modelado de conexiones

Como la tesis se centra en el enlace descendente, se puede asumir que los eNBs y los PeNBs actúan como fuentes generadoras de tráfico y transmisores de señal, mientras que los UEs se limitan a recibir la señal, demodular los datos recibidos y calcular las correspondientes estadísticas de calidad del enlace y de tráfico. Además, sin pérdida de generalidad, se asume que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos en el DL desde el nodo que le da servicio. Las conexiones se componen fundamentalmente de los siguientes dos elementos:

- *Fuente generadora de paquetes*: En función del 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 dispone de dos buffers independientes. Por un lado, se dispone del buffer de salida, que almacena los nuevos paquetes generados pendientes de ser transmitidos. Y por otro lado se dispone del buffer de ARQ (Automatic Repeat reQuest), 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 transmitir paquetes, puesto que el retardo acumulado por estos

paquetes es mayor. El tiempo máximo que un paquete puede permanecer en los buffers de la conexión del usuario u (D_{max}^u) es un parámetro que depende del tipo de servicio considerado.

En concreto, para este capítulo se va a considerar un modelo de tráfico a ráfagas, siguiendo un proceso de tipo ON-OFF. El modelo no se ajusta a ningún servicio específico (voz, video, etc.), pero permite evaluar, sin pérdida de generalidad, las prestaciones de los esquemas de ICIC y del criterio de selección de nodo que se proponen en este capítulo. Durante el periodo ON, la fuente genera un nuevo paquete en cada subtrama de longitud L bits, que será añadido al buffer de salida. Mientras que en el estado OFF la fuente no genera ningún paquete de datos. 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 ecuación (3.11). Este tipo de servicio está limitado por el retardo, es decir, que cuando un paquete lleva almacenado en los buffers de la conexión D_{max}^u subtramas, dicho paquete es descartado. Por lo tanto, se asume un sistema con la aplicación de cotas de retardo hard.

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (3.11)$$

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

Se tiene en cuenta además un mecanismo de ARQ para la retransmisión de paquetes de datos erróneos, de tal forma que cuando un TU es recibido de forma errónea por el usuario, este TU es almacenado en un buffer especial de ARQ. Se considera un tiempo Δ_{ARQ} durante el cual el paquete de datos debe permanecer en el buffer de ARQ antes de poder ser retransmitido. Δ_{ARQ} permite modelar el tiempo que transcurre 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. Con el fin de evitar que el mecanismo de ARQ bloquee la comunicación con sucesivas retransmisiones del mismo paquete de datos, se ha fijado un límite máximo de n_{RTX} retransmisiones. Por lo tanto, un TU es descartado si tras n_{RTX} retransmisiones se vuelve a recibir erróneamente.

3.4.5 Máscaras de potencia

Para definir los valores de la máscara de potencia empleada en los dos tipos de nodo es necesario tener en cuenta el número de RBs asignables por cada nodo. Respecto a los eNBs, hay que tener en cuenta que se considera una subbanda exterior de recursos, y, por lo tanto, dos niveles de potencia de transmisión. La potencia de transmisión por RB en la subbanda exterior ($M_{med,c}^{ext}$) se define como un incremento Δ_{ext} , respecto a la potencia de transmisión por RB en la subbanda interior ($M_{med,c}^{int}$), tal y como se expresa en la ecuación (3.12). Por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación (3.12), los dos niveles de la máscara de potencia, $M_{med,c}^{int}$ y $M_{med,c}^{ext}$, se obtienen mediante la ecuación (3.13), donde $N_{total,int,c}$ es el número total de RBs de la subbanda interior de la celda c , $N_{total,ext,c}$ es el número total de RBs de la subbanda exterior de la celda c y $P_{T,max}^c$ es la potencia máxima de transmisión de la celda c .

$$M_{med,c}^{ext} \left[\frac{dBm}{RB} \right] = M_{med,c}^{int} \left[\frac{dBm}{RB} \right] + \Delta_{ext} [dB] \quad (3.12)$$

$$N_{total,int,c} \cdot 10^{\frac{M_{med,c}^{int} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} + N_{total,ext,c} \cdot 10^{\frac{M_{med,c}^{ext} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} = P_{T,max}^c [mW] \quad (3.13)$$

En el caso de los PeNBs se define un único nivel de potencia de transmisión ($M_{med,p}$), de tal forma que la potencia máxima de transmisión de la picocelda ($P_{T,max}^p$) se distribuye de forma equitativa entre todos los RBs asignables (3.14). $N_{total,p}$ es el número total de RBs que son asignables por el PeNB p . Como la asignación de potencia es adaptativa, se consideran además los umbrales M_{min} y M_{max} , con el objetivo de limitar el incremento en la variabilidad de la interferencia. Los valores de las máscaras mínima y máxima se calculan como un decremento de Δ_{min} , y como un incremento de Δ_{max} , sobre el correspondiente valor de la máscara media (M_{med}).

$$N_{total,p} \cdot 10^{\frac{M_{med,p} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} = P_{T,max}^p [mW] \quad (3.14)$$

3.4.6 Scheduling temporal

El objetivo del scheduling temporal es tratar de garantizar la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios, proporcionando una distribución equitativa de recursos por medio de la priorización de los tráficos a la hora de asignar recursos. La priorización de las distintas conexiones se puede realizar en función de diferentes criterios, y como en este capítulo el modelo de tráfico considerado

es un modelo ON-OFF, que es un modelo con restricciones de retardo, se ha considerado la política de scheduling temporal representada en la ecuación (3.15). De esta forma, el scheduler temporal asigna un índice de prioridad a cada usuario u en cada TTI. La política de scheduling temporal se basa en el retardo acumulado de los paquetes almacenados en los buffers de las conexiones de los usuarios, siendo D_{max}^u la cota máxima de retardo para el servicio cursado por el usuario y d_{HOL}^u el retardo acumulado del TU que se encuentra en la cabecera de los buffers de la conexión del usuario. Al aplicar una ponderación teniendo en cuenta la cota máxima de retardo, esta estrategia de scheduling temporal permite tratar de forma equitativa conexiones con diferentes cotas máximas de retardo. Posteriormente, el scheduler frecuencial asignará recursos prioritariamente a aquellos usuarios con mayor índice de prioridad.

$$u^* = \underset{u}{\operatorname{arg\,max}} \left(\frac{d_{HOL}^u}{D_{max}^u} \right) \quad (3.15)$$

3.4.7 Scheduling frecuencial

En el caso de los eNBs, como se considera el esquema FFRopa como esquema de ICIC se aplica el algoritmo de scheduling frecuencial descrito en el apartado 2.3.1.1. Respecto a los PeNBs, el algoritmo aplicado sigue el mismo procedimiento que el empleado en los eNBs, pero sin considerar un ordenamiento en la asignación de los recursos frecuenciales. Hay que tener en cuenta que la potencia de transmisión de los PeNBs es más baja que la de los eNBs, y además en la configuración de despliegue que se considera en este capítulo solo se despliega una picocelda en cada eNB. Por lo tanto, la interferencia que introducen las picoceldas a los mUEs que se encuentran en las cercanías no será demasiado alta, pudiendo además el scheduler seleccionar para estos mUEs recursos en los que observen buenas condiciones de canal. Por ello se ha optado por favorecer la flexibilidad en la asignación de recursos frecuenciales en las picoceldas, a costa de incrementar ligeramente la variabilidad de la interferencia sufrida por los mUEs cercanos. Es el scheduling frecuencial el que se encarga de realizar la adaptación de tasa, seleccionando el MCS que se asigna a cada UE en función de los CQIs que envía el UE al nodo que le da servicio. De esta forma, el scheduler garantiza que la SINR que se estima que observará el UE es igual o mayor que la SINR umbral que se requiere por el MCS m asignado ($SINR_{req}^m$), cuyos valores se recogen en la Tabla 3.1.

Por lo tanto, el scheduling frecuencial intenta asignar a cada UE en aquellos RBs en los que obtiene mejores condiciones de canal dentro del conjunto de RBs disponibles, que viene determinado por el esquema de ICIC. Si la asignación de un UE no es posible, se inicia el proceso de renegociación con el objetivo de

reubicar a otros UEs ya asignados, y liberar RBs que puedan ser asignados al UE que se está considerando. De la misma forma que en el caso de los eNBs, después de realizar una asignación de RBs se vuelven a calcular los índices de prioridad temporal de todos los usuarios, reordenándose con la nueva prioridad actualizada. Además, en el caso de los PeNBs también se considera el proceso de adaptación de potencia descrito para el esquema FFRopa. Por lo tanto, una vez definida la máscara de potencia media (M_{med}), la potencia asignada en cada RB puede adaptarse en función de las condiciones de canal observadas por cada UE, pero manteniendo siempre la potencia asignada dentro de los umbrales M_{min} y M_{max} con el objetivo de limitar la variabilidad de la interferencia generada.

3.4.8 Patrón de movimiento de los usuarios

Los usuarios se desplazan a una velocidad de 3 Km/h siguiendo una trayectoria rectilínea. Cada cierto tiempo los usuarios pueden realizar un cambio en su dirección de desplazamiento en un ángulo entre $-\pi/2$ y $\pi/2$, que se escoge de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme. Además, el movimiento de los UEs está restringido para que siempre se mantengan dentro de los límites de su respectivo sector para evitar handovers entre sectores y entre eNBs vecinos. Debido a esta restricción, un UE podrá estar conectado a su sector del eNB o al PeNB desplegado en su eNB.

3.4.9 Parámetros de simulación

Los parámetros empleados para la evaluación de los esquemas de ICIC que se proponen y del criterio de selección de nodo se recogen en la Tabla 3.3. Los parámetros se han seleccionado de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32], considerando la estructura de trama FDD. La tabla incluye los parámetros relacionados con el despliegue de la red, así como los parámetros relacionados con el modelado del canal radio, y con las características de transmisión y recepción de los eNBs, PeNBs y UEs.

Parámetro	Valor
Despliegue	19 celdas trisectorizadas ($NBS = 19$) y 1 PeNB por celda
Distancia entre estaciones base (ISD)	1732 m
Frecuencia central	2.5 GHz
Ancho de banda del sistema (BW)	5 MHz
Periodo de scheduling (TTI)	1 ms
Símbolos OFDM por TTI	14 (4 de ellos para control y pilotos)
Número de RBs	27
Tamaño del RB	12 subportadoras durante 1 TTI
Modelo de propagación	eNB→UE: $128.1 + 37.6\log_{10}(d[\text{km}])$
	PeNB→UE: $140.7 + 37.6\log_{10}(d[\text{km}])$
Desviación estándar del shadowing (σ)	eNB→UE: 8 dB
	PeNB→UE: 10 dB
Correlación en el shadowing entre celdas	0.5
Distancia de correlación del shadowing	50 m
Modelo multicamino	Pedestrian-A extendido (3km/h)
Modelo Doppler	Jakes
Densidad espectral de ruido	-174 dBm/Hz
Potencia máxima de transmisión (eNB)	43 dBm
Ganancia de antena (eNB)	14 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (eNB)	70° (-3 dB) con 25 dB de relación delante-atrás
Potencia máxima de transmisión (PeNB)	30 dBm
Ganancia de antena (PeNB)	5 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (PeNB)	Omnidireccional
Ganancia de antena (UE)	0 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (UE)	Omnidireccional
Ganancia de diversidad en transmisión	3 dB
Ganancia de diversidad en recepción	3 dB
Figura de ruido del receptor (UE)	9 dB

Tabla 3.3: Parámetros generales de simulación

Además de estos parámetros generales, en la Tabla 3.4 se recogen los valores concretos que se han considerado en relación al mecanismo de CQI, y en la Tabla 3.5 se recogen los valores considerados para el modelo de tráfico ON-

OFF y para el mecanismo de ARQ. Con el objetivo de analizar la capacidad de los esquemas de RRM (Radio Resource Management) que se proponen para satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios en términos de retardo de paquetes, se considera una cota máxima de retardo de $D_{max}^u = 50$ ms, tiempo tras el cual el TU es descartado. Por lo tanto, la tasa de descarte es una métrica directa de la capacidad del sistema para garantizar los requisitos de QoS demandados por los UEs. Respecto al mecanismo de ARQ, de acuerdo con las propuestas consideradas en la literatura, el tiempo durante el cual un paquete de datos que se ha recibido erróneamente debe permanecer en el buffer de ARQ antes de poder ser retransmitido, se puede fijar en $\Delta_{ARQ} = 6$ ms para sistemas LTE. Con el fin de evitar que el mecanismo de ARQ bloquee la comunicación con sucesivas retransmisiones del mismo paquete de datos, se ha fijado $n_{RTX} = 4$ retransmisiones.

Parámetro	Valor
ΔT_{CQI}	1 ms
W_{CQI}	4 ms
Δ_{CQI}	2 ms

Tabla 3.4: Esquema de CQI

Parámetro	Valor
T_{ON}	30 ms
T_{OFF}	90 ms
α	1/4
L	240 bits
D_{max}^u	50 ms
Δ_{ARQ}	6 ms
n_{RTX}	4

Tabla 3.5: Parámetros del modelo ON-OFF y del mecanismo de ARQ

En la Tabla 3.6 se recopilan los valores de las máscaras de potencia empleadas en los eNBs y PeNBs para los esquemas de ICIC propuestos. El incremento de potencia considerado para la subbanda exterior de los eNBs (Δ_{ext}) es de 5 dB. Y para calcular los valores de las máscaras mínima y máxima se ha considerado $\Delta_{min} = 3$ dB y $\Delta_{max} = 3$ dB. Hay que tener en cuenta, que al margen de la especificación LTE, cuando el número de RBs preasignados a los PeNBs es menor que el número de RBs disponibles en el sistema, se ha presupuestado un nivel de potencia en las señales de referencia incrementado respecto a la

EPRE (Energy Per RE), y asimismo un nivel de transmisión por RB más alto, asumiendo que la potencia total ($P_{T,max}^p$) se va a repartir equitativamente entre solo un subconjunto de los REs del ancho de banda total del sistema.

eNBs (FFRopa) [dBm/RB]				
Subbanda	NRB	M_{med}	M_{min}	M_{max}
Interior	18	26.33	23.33	29.33
Exterior	9	31.33	28.33	34.33
PeNBs (FFRopa_xRBs) [dBm/RB]				
NRB	M_{med}	M_{min}	M_{max}	
6	22.22	19.22	25.22	
10	20.00	17.00	23.00	
18	17.45	14.45	20.45	
24	16.20	13.20	19.20	

Tabla 3.6: Máscaras de potencia eNBs y PeNBs

Respecto a la distribución de los UEs, en las simulaciones que se han llevado a cabo en este capítulo se distribuyen NUE_{eNB} usuarios en cada eNB de forma homogénea, de tal forma que la cantidad de usuarios en cada una de las tres zonas que se definen en la celda (Figura 3.9) es la misma. De forma adicional, se distribuyen NUE_{peNB} usuarios de forma homogénea en un círculo de radio 100 metros alrededor de cada PeNB. Estos UEs tienen restringido su movimiento para permanecer siempre dentro de los límites del círculo de radio 100 metros. De esta forma se puede controlar mejor la concentración de usuarios en la zona en la que se despliega cada picocelda, pudiendo generar escenarios con una alta concentración de usuarios en los alrededores de las picoceldas. En la Figura 3.13 se representa la distribución de UEs empleada en este capítulo. Merece la pena destacar, que todos los UEs serán conectados al nodo (eNB o PeNB) que corresponda aplicando siempre el criterio de selección de nodo expresado en la ecuación (3.6). Es decir, que aunque los NUE_{peNB} usuarios son concentrados alrededor del PeNB, podrán conectarse tanto al PeNB como al eNB.

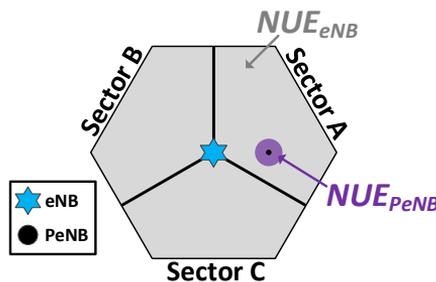


Figura 3.13: Distribución de UEs

3.5 Resultados numéricos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para los esquemas de coordinación de interferencias propuestos para despliegues de picoceldas: FFRopa_xRBs. Estos resultados se comparan con la alternativa de considerar un esquema FFR convencional como esquema de ICIC entre macroceldas. Además, una vez analizados los diferentes esquemas de coordinación de interferencias, se evalúa de forma conjunta las prestaciones del criterio de selección de nodo basado en CRE, para diferentes valores de bias y considerando varios escenarios con diferentes condiciones de carga de tráfico. En la Figura 3.14 se representan las tres posiciones de despliegue de los PeNBs que se han considerado en las simulaciones. El objetivo es poder evaluar las prestaciones tanto en escenarios en los que los PeNBs son desplegados en la zona interior de la celda ($d = 200 \text{ m} \approx 0.2 \cdot R$ y $d = 400 \text{ m} \approx 0.4 \cdot R$), como en situaciones en las que son desplegados en la zona exterior de la celda ($d = 750 \text{ m} \approx 0.75 \cdot R$).

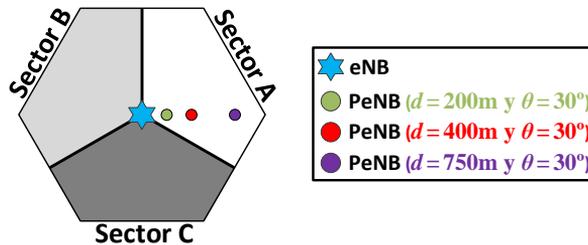


Figura 3.14: Posiciones de despliegue de los PeNBs

Las simulaciones que se presentan tienen como objetivo evaluar los límites de operación del sistema a nivel de paquete, es decir, los límites de la región de scheduling de los esquemas de coordinación de interferencias que se proponen, determinando el número máximo de conexiones activas que puede soportar el sistema asegurando los requisitos de QoS a nivel de paquete. Como el modelo de tráfico considerado en este capítulo es un modelo con restricciones de retardo, la evaluación de las prestaciones ofrecidas por los esquemas de ICIC que se proponen, y por el criterio de selección de nodo que se considera, se basa en la tasa de descarte de TUs. Queda fuera del alcance de este capítulo 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.

La tasa de descarte de TUs es el porcentaje de TUs que se descartan por haber excedido el retardo máximo permitido por el servicio cursado por el UE

(D_{max}^u) , sin haber sido recibidos correctamente. La capacidad global del sistema se ha evaluado en términos del número de usuarios que puede servir el sistema satisfaciendo una cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) del 1%. Por lo tanto, se considera que se están satisfaciendo los requisitos de QoS de los usuarios si el porcentaje de descarte promedio es inferior al 1%.

En la Figura 3.15 se representa el porcentaje de TUs descartados para los cuatro esquemas de ICIC propuestos, separando los resultados entre mUEs y pUEs. Las picoceldas se despliegan a 400 m de distancia de los eNBs ($d = 400$ m) y con un ángulo $\theta = 30^\circ$. Se despliegan 63 UEs en cada eNB de forma homogénea ($NUE_{eNB} = 63$), y se varía el número de UEs que se despliegan alrededor de las picoceldas (NUE_{peNB}), siguiendo la distribución mostrada en la Figura 3.13. Con el objetivo de analizar las prestaciones de los diferentes esquemas de ICIC propuestos, sin la influencia del criterio de selección de nodo, se ha ajustado el valor del bias (ecuación (3.6)) para que en general todos los UEs que son desplegados en los alrededores de las picoceldas (NUE_{peNB}) se conecten realmente a las picoceldas. Si en primer lugar se analizan los resultados mostrados en la Figura 3.15(a) para el esquema FFRopa_6RBs, puede verse que si los PeNBs tienen disponibles 6 RBs para asignar a sus pUEs, cada PeNB es capaz de satisfacer los requisitos de QoS de aproximadamente 34 UEs. En este esquema las picoceldas pueden emplear los RBs pertenecientes a las subbandas exteriores de los dos sectores restantes del eNB en el que están desplegadas. A pesar de que estos RBs pertenecen a la subbanda exterior de los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, gracias a que se considera sectorización estricta en la subbanda exterior, estos RBs nunca podrán ser asignados por el propio sector sobre el que está desplegada la picocelda. Además, la interferencia siempre proviene de los mismos sectores, por lo que las condiciones de interferencia sufridas por los pUEs en estos RBs son bastante estables. Gracias a ello los PeNBs son capaces de proporcionar servicio a una cantidad notable de UEs con solo 6 RBs disponibles.

Si se incrementan a 10 los RBs disponibles en cada PeNB (FFRopa_10RBs), cada PeNB es capaz de proporcionar servicio a aproximadamente 57 UEs. En este esquema de ICIC se añaden los dos RBs de la subbanda interior preasignada a cada uno de los dos sectores restantes, que según el ordenamiento seguido en FFRopa serán empleados en último lugar. Estos RBs pertenecen a la subbanda interior, y por lo tanto, el nivel de interferencia que sufren los pUEs en estos RBs es en general más bajo, que el nivel que sufren en los 6 RBs pertenecientes a la subbanda exterior de los dos sectores restantes del eNB. Sin embargo, estos RBs pueden ser asignados en cualquier momento por el propio sector en el que está desplegado el PeNB, y también de forma simultánea por los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Por lo tanto, los niveles de

interferencia observados por los pUEs en estos RBs pueden ser muy elevados en determinadas subtramas, y además, la interferencia es más variable, ya que puede provenir de diferentes sectores en cada subtrama. No obstante, como se escogen los RBs que serán empleados en último lugar, estos RBs pueden quedarse sin asignar en el propio eNB o en los eNBs vecinos. Teniendo estos aspectos en cuenta, los resultados muestran que a pesar de disminuirse la potencia de transmisión por RB de los PeNBs al incrementarse los RBs disponibles, la eficiencia espectral alcanzada por RB por las picoceldas se mantiene respecto a la alcanzada en el esquema FFRopa_6RBs. La eficiencia espectral puede estimarse a grandes rasgos teniendo en cuenta el número de pUEs a los que son capaces de proporcionar servicio los PeNBs satisfaciendo sus requisitos de QoS, frente al número de RBs asignables por las picoceldas. Por lo tanto, puede concluirse que las condiciones de interferencia observadas por los pUEs en los 4 RBs adicionales son aceptables, y que la potencia transmitida por RB de las picoceldas sigue siendo suficiente para contrarrestar la interferencia cross-layer. Esto permite incrementar notablemente el número de UEs a los que pueden dar servicio las picoceldas.

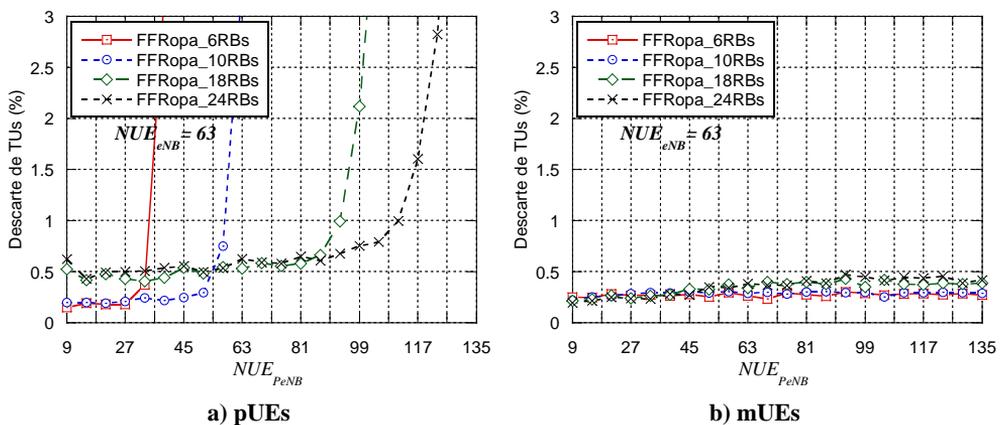


Figura 3.15: Porcentaje de TUs descartados para los esquemas FFRopa_xRBs ($d = 400$ m y $\theta = 30^\circ$)

Cuando se da un paso más y se permite que las picoceldas asignen por completo la subbanda interior preasignada a cada uno de los dos sectores restantes de su eNB (FFRopa_18RBs), cada PeNB es capaz de proporcionar servicio a aproximadamente 93 UEs. Al incrementar la cantidad de RBs disponibles se reduce la potencia transmitida por RB, por lo que los pUEs son más vulnerables a la interferencia cross-layer. Además, los niveles de interferencia que reciben los pUEs en los RBs adicionales de la subbanda interior son más altos, pudiendo ser asignados con mayor frecuencia por el propio sector en el que está desplegada la picocelda. Ambos aspectos provocan

la reducción de la eficiencia espectral alcanzada por RB, si se compara con la obtenida para los esquemas FFRopa_6RBs y FFRopa_10RBs. No obstante, esta degradación de la eficiencia espectral se compensa significativamente con la ganancia derivada del incremento de RBs disponibles, aumentándose notablemente el número de UEs a los que pueden dar servicio los PeNBs.

Incrementando todavía más el reuso frecuencial de los PeNBs se llega al esquema FFRopa_24RBs, en el que se añade la subbanda interior preasignada al propio sector en el que está desplegado el PeNB. La interferencia recibida por los pUEs en estos RBs adicionales es muy fuerte, sin embargo, el scheduling frecuencial puede asignar estos RBs a aquellos pUEs que observan buenas condiciones de canal, para contrarrestar la elevada interferencia. Como puede verse en la Figura 3.15(a) el esquema FFRopa_24RBs proporciona buenas prestaciones, permitiendo incrementar el número de UEs a los que puede dar servicio cada PeNB hasta los 111 UEs. Por lo tanto, la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales permite compensar significativamente la reducción en la potencia de transmisión de los PeNBs, así como el hecho de que las condiciones de interferencia en los RBs que se añaden sean agresivas.

En la Figura 3.15(a) se puede observar que incluso cuando el número de UEs concentrados alrededor de las picoceldas es muy bajo, siempre existe un porcentaje de descarte de TUs residual. Esto se debe a pUEs que se encuentran ubicados lejos de su PeNB, y que observan niveles de SINR demasiado bajos, debido a la reducida potencia de transmisión de los PeNBs y a la fuerte interferencia que reciben de los eNBs. Los bajos niveles de SINR provocan que estos pUEs no sean capaces de recibir asignación en buena parte de las subtramas, ya que no alcanzan el umbral de SINR requerido por el MCS más bajo del sistema (MCS0), acumulándose retraso en los paquetes de datos de los buffers de sus conexiones, e incrementándose su tasa de descarte de TUs. Puede verse en los resultados que este porcentaje de descarte de TUs residual es mayor a medida que se incrementa el número de RBs disponibles en las picoceldas, debido a que la potencia de transmisión por RB es más baja, y por lo tanto, los pUEs que se encuentran lejos de su PeNB son más vulnerables a la interferencia cross-layer.

Respecto a los mUEs, en la Figura 3.15(b) se representa el porcentaje de descarte de TUs para los cuatro esquemas de ICIC propuestos. Puede observarse que incrementar el reuso frecuencial aumentando los recursos disponibles en las picoceldas degrada solo ligeramente las prestaciones de los mUEs. Gracias a que la potencia de transmisión de los PeNBs es más baja que la de los eNBs, la interferencia cross-layer que sufren los mUEs que se encuentran en los alrededores de los PeNBs no es muy fuerte. Además, el scheduling frecuencial siempre tratará de asignar a estos mUEs en aquellos RBs en los que observan

buenas condiciones de canal. Por lo tanto, el esquema FFRopa_24RBs es el esquema de ICIC que proporciona las mejores prestaciones, permitiendo aumentar notablemente el número de UEs que pueden servir las picoceldas. Se puede concluir que la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los PeNBs permite mejorar significativamente las prestaciones del sistema, gracias a que permite compensar la degradación debida a la reducción en la potencia transmitida por RB de los PeNBs, así como el hecho de que los niveles interferentes que sufren los pUEs en los RBs que se van añadiendo son elevados. Además, el incremento en los RBs disponibles de los PeNBs no tiene un impacto significativo en las prestaciones de los mUEs.

Una vez que se han analizado los beneficios derivados de incrementar los recursos frecuenciales de los que disponen los PeNBs, otro aspecto interesante a analizar son los efectos que tienen los esquemas de ICIC que se aplican entre eNBs sobre las prestaciones de los PeNBs. Para ello, en la Figura 3.16 se compara el porcentaje de TUs descartados obtenido por el esquema FFRopa_24RBs, frente a un esquema basado en FFR, al que se ha denominado FFR_24RBs. La única diferencia entre ambos esquemas es que en el caso de FFR_24RBs, el esquema de ICIC empleado entre eNBs es el esquema FFR con sectorización en la subbanda exterior. En ambos casos las picoceldas disponen de 24 RBs para asignar a sus usuarios, y son desplegadas a 400 m de distancia de los eNBs ($d = 400$ m) y con un ángulo $\theta = 30^\circ$. Se despliegan 63 UEs en cada eNB de forma homogénea ($NUE_{eNB} = 63$), y se varía el número de UEs que se despliegan alrededor de las picoceldas (NUE_{PeNB}). Si en primer lugar se analiza el porcentaje de descarte de los mUEs, puede verse que el esquema FFRopa permite disminuirlo, gracias a la reducción de la variabilidad de la ICI conseguida mediante la aplicación de una ordenación en la asignación de los RBs, y gracias también al procedimiento de adaptación de potencia.

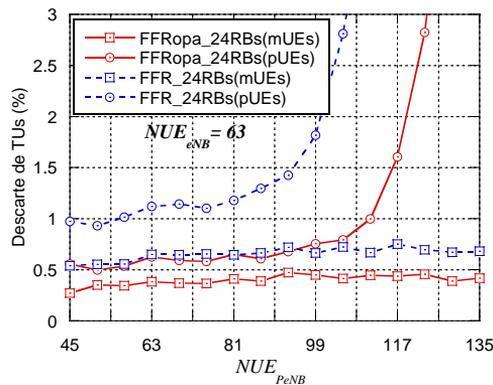


Figura 3.16: Comparativa entre los esquemas FFRopa y FFR ($d = 400$ m y $\theta = 30^\circ$)

Respecto a las prestaciones de los PeNBs, puede verse que emplear el esquema de ICIC FFR_{opa} entre los eNBs permite incrementar de forma notable el número de UEs a los que es capaz de proporcionar servicio cada PeNB. En el esquema FFR no se realiza una preasignación de los RBs pertenecientes a la subbanda interior entre los diferentes sectores del eNB. Por lo tanto, la interferencia que sufren los pUEs en los RBs de la subbanda interior puede variar drásticamente entre dos subtramas consecutivas, ya que la interferencia puede provenir de cualquier sector. Esta elevada variabilidad de la interferencia provoca un incremento de asignaciones de recursos erróneas, ya que las condiciones de interferencia que observa un pUE cuando recibe una asignación en un RB, pueden distar mucho de las condiciones de interferencia que se han estimado para tomar la decisión de la asignación. Estos errores en la asignación de recursos conllevan que los pUEs no sean capaces de demodular correctamente los datos recibidos, incrementándose la BLER y reduciendo drásticamente las prestaciones de la red. Por el contrario, cuando se emplea el esquema FFR_{opa} como esquema de ICIC entre los eNBs, las condiciones de interferencia que sufren los pUEs son mucho más estables, y por lo tanto el scheduling frecuencial es capaz de estimar con mayor precisión las condiciones de interferencia que observarán los pUEs en el momento de la asignación. Gracias a ello, los paquetes de datos de las conexiones de los usuarios acumulan un menor retardo, reduciéndose la tasa de descarte de TUs, e incrementándose el número de UEs a los que los PeNBs son capaces de satisfacer sus requisitos de QoS.

Una vez concluido que las mejores prestaciones se obtienen cuando se emplea el esquema FFR_{opa} como esquema de ICIC entre eNBs, y cuando se amplían los recursos frecuenciales disponibles en los PeNBs a 24 RBs, los siguientes análisis se centran en evaluar los efectos del criterio de selección de nodo en los despliegues picocelulares. Considerando el criterio de selección de nodo basado en el concepto CRE (ecuación (3.6)), en la Tabla 3.7 se muestra el porcentaje de UEs que realmente permanecen conectados a los PeNBs, frente al número total de UEs que son desplegados en el círculo de radio 100 metros alrededor de cada PeNB (NUE_{PeNB}) tal y como se muestra en la Figura 3.13, para diferentes valores de bias y para las diferentes distancias de despliegue (d) consideradas (Figura 3.14). Como cabría esperar, el porcentaje de UEs conectados a los PeNBs se reduce drásticamente a medida que se acercan los PeNBs a los eNBs, debido a la diferencia en la potencia de transmisión. Cuando los PeNBs se despliegan en la zona exterior de los eNBs, puede no ser necesaria la aplicación de un bias a la RSRP de los PeNBs. Por el contrario, cuando los PeNBs se despliegan más hacia el interior de los eNBs será necesario considerar un bias, si el objetivo buscado es que los PeNBs sean capaces de descargar parte de los usuarios de los eNBs, especialmente en zonas con alta densidad de

usuarios. Merece la pena destacar que para obtener los porcentajes mostrados en la Tabla 3.7 se han omitido los efectos de los desvanecimientos lentos (shadowing) y rápidos (Rayleigh), por lo que en los resultados que se presentan a continuación los porcentajes de UEs conectados a los PeNBs pueden variar ligeramente.

Distancia del PeNB (d)	Bias 0 dB	Bias 5 dB	Bias 10 dB	Bias 15 dB	Bias 20 dB
200 m	24.5 %	38.5 %	60.5 %	81 %	91.5 %
400 m	60 %	85 %	97 %	100 %	100 %
750 m	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tabla 3.7: Porcentaje de UEs que se conectan a las picoceldas ($\theta = 30^\circ$)

Como el esquema de ICIC que mejores resultados obtiene es el esquema FFRopa_24RBs, en los resultados que se presentan a continuación para evaluar los efectos del criterio de selección de nodo se emplea este esquema. En la Figura 3.17 se representa el porcentaje de TUs descartados para las tres distancias de despliegue de los PeNBs (d) diferentes, y variando el valor del bias aplicado en el criterio de selección de nodo (ecuación (3.6)). El ángulo de despliegue de los PeNBs se mantiene fijo ($\theta = 30^\circ$), y los resultados se muestran de forma separada entre mUEs y pUEs. En este primer escenario se analiza el criterio de selección de nodo ante una situación con baja carga tanto en los eNBs, como en los PeNBs, de tal forma que se despliegan $NUE_{eNB} = 54$ usuarios de forma homogénea en cada eNB y $NUE_{PeNB} = 87$ usuarios en las cercanías de cada PeNB (Figura 3.13). Como la carga del sistema no es muy alta, puede verse que el porcentaje de TUs descartados es bajo en los 3 escenarios, estando siempre por debajo de la $Cota_{desc}^{obj}$. En la Tabla 3.8 se recoge además el porcentaje de descarte de TUs a nivel global, así como el porcentaje de descarte de TUs observado por el 5% de peores mUEs y pUEs.

Si en primer lugar se analizan las prestaciones de los mUEs (Figura 3.17(a)), puede verse que a medida que se aumenta el bias, el porcentaje de TUs descartados por los mUEs se reduce, especialmente en los casos en los que $d = 200$ m y $d = 400$ m. Y es que cuando los PeNBs están ubicados más cerca de los eNBs, solo una parte de los UEs que se encuentran en los alrededores de los PeNBs se conectan realmente a los PeNBs, incrementándose la carga de los eNBs. Por ello a medida que se incrementa el bias, más UEs se conectan a los PeNBs, reduciendo la carga de los eNBs, y disminuyendo el porcentaje de TUs descartados gracias a una mayor disponibilidad de RBs. En la Tabla 3.8 puede verse como también el porcentaje de descarte del 5% de los peores mUEs se reduce a medida que se aumenta el bias. Por lo tanto, también se puede concluir que el aumento de las transmisiones por parte de los PeNBs, al incrementar el número de pUEs a los que dan servicio, no degrada significativamente las

prestaciones de los mUEs. Aunque merece la pena destacar, que la carga de tráfico de los PeNBs en este escenario no es elevada.

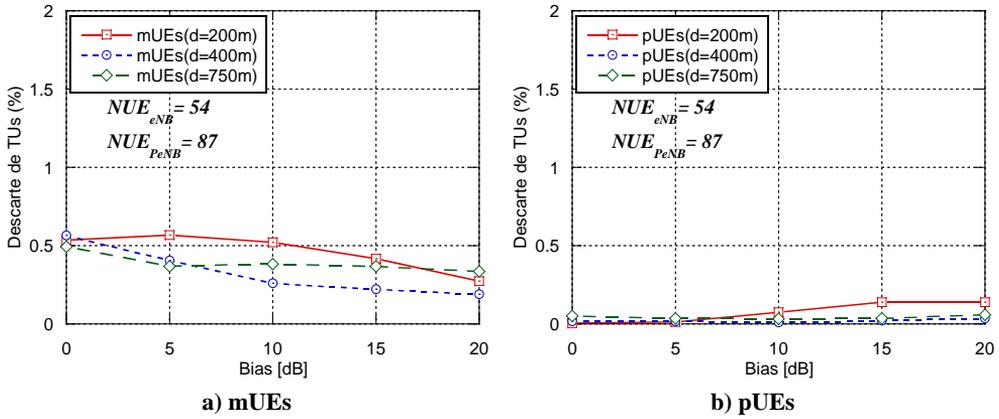


Figura 3.17: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 87$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)

Por otro lado, en la Figura 3.17(b) puede verse que para el caso en el que $d = 200$ m, el porcentaje de TUs descartados por los pUEs aumenta a medida que se incrementa el bias. Como los PeNBs están ubicados bastante cerca de los eNBs, la interferencia que sufren los pUEs es bastante elevada, especialmente en los RBs pertenecientes a la subbanda interior preasignada al propio sector en el que está desplegado el PeNB. Por lo tanto, los pUEs adicionales que se conectan a los PeNBs a medida que se aumenta el bias, observan niveles de SINR bajos, incrementándose el porcentaje de TUs descartados. No obstante, como la carga de los eNBs es baja, los niveles interferentes observados por los pUEs todavía no son excesivos, obteniéndose porcentajes de descarte de TUs muy por debajo del 1% para las tres distancias de despliegue.

Bias [dB]	Distancia (d): 200 m			Distancia (d): 400 m			Distancia (d): 750 m		
	Global	5 % peores		Global	5 % peores		Global	5 % peores	
		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs
0	0.44	0.1	1.5	0.35	0.3	1.7	0.25	1.1	1.4
5	0.42	0.2	1.5	0.22	0.3	1.2	0.17	0.8	1.1
10	0.35	1.3	1.2	0.12	0.2	0.8	0.17	0.8	1.1
15	0.29	2.3	0.9	0.10	0.5	0.7	0.16	0.9	1.1
20	0.20	2.5	0.6	0.01	0.8	0.6	0.16	1.6	1.0

Tabla 3.8: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 87$)

Si solo se tuviera en cuenta el porcentaje de descarte de TUs global (Tabla 3.8), aplicar un bias de 20 dB sería la mejor alternativa. Sin embargo, si también se tiene en cuenta el porcentaje de TUs descartados de los peores UEs, puede verse que a medida que se aumenta el bias, el porcentaje de descarte de los peores pUEs se incrementa, especialmente cuando $d = 200$ m. Esto es debido a que los pUEs adicionales que se conectan a los PeNBs cuando se aplica un bias reciben un nivel de señal del propio eNB bastante elevado, por lo que los niveles de SINR observados no son altos. Por lo tanto, en este escenario el valor de bias más recomendado sería 10 dB, ya que para valores más elevados de bias, los pUEs que se encuentran más alejados de los PeNBs empeoran demasiado sus prestaciones.

En la Figura 3.18 se representa el porcentaje de TUs descartados cuando se incrementa la carga de los eNBs, de tal forma que $NUE_{eNB} = 72$ usuarios se despliegan homogéneamente en cada eNB, mientras que se mantiene la misma concentración de UEs en las cercanías de los PeNBs ($NUE_{PeNB} = 87$). En este escenario, como la carga de los eNBs es más alta, puede verse en la Figura 3.18(a) que para las tres distancias de despliegue el porcentaje de descarte de TUs de los mUEs está entorno al 1%. Si también se consideran los resultados recogidos en la Tabla 3.9, puede verse que al incrementar el bias se reduce, tanto el porcentaje de TUs descartados a nivel global por los mUEs, como el porcentaje de descarte del 5% de los peores mUEs, gracias a que se reduce la carga de los eNBs.

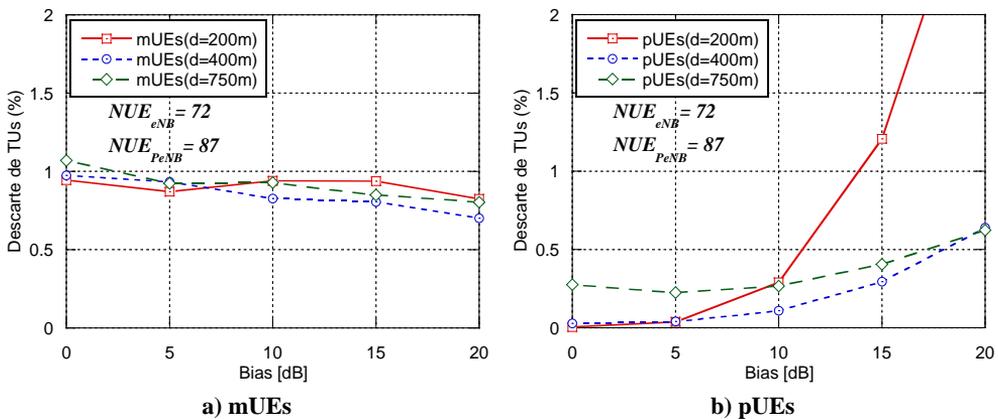


Figura 3.18: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 87$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)

Respecto a los pUEs, en la Figura 3.18(b) puede verse que el incremento del porcentaje de descarte de TUs a medida que se aumenta el bias considerado en el criterio de selección de nodo, es mucho más significativo que en el escenario anterior (Figura 3.17(b)). Esto es debido a que el número de UEs conectados a

los eNBs es más alto, y por lo tanto, la ocupación de RBs por parte de los eNBs es mayor, incrementándose la interferencia sufrida por los pUEs. De la misma forma que en el escenario anterior, cuando los PeNBs se despliegan a una distancia $d = 200$ m, la interferencia sufrida por los pUEs proveniente de su propio eNB es más fuerte que en las otras dos distancias de despliegue d , degradándose sus prestaciones de forma más significativa. En la Tabla 3.9 puede verse que aplicar un valor de bias por encima de 5 o 10 dB provoca un rápido incremento del porcentaje de descarte del 5% de peores pUEs. Los pUEs adicionales que se conectan a los PeNBs al aplicar un bias al criterio de selección de nodo, son UEs que reciben un mayor nivel de RSRP del eNB, y por lo tanto, como en este escenario la carga de los eNBs es alta, estos pUEs reciben niveles de SINR bajos, no siendo capaces de satisfacer sus requisitos de QoS, e incrementándose rápidamente la tasa de descarte de TUs para valores de bias elevados. Si nos centramos en evitar un porcentaje de descarte demasiado alto para los UEs que reciben las peores prestaciones, el valor de bias escogido para este escenario sería 5 dB. Ya que incrementar el bias por encima de 5 dB no aporta una gran ventaja respecto al porcentaje de descarte global, y sin embargo degrada rápidamente las prestaciones del 5% de peores pUEs.

Bias [dB]	Distancia (d): 200 m			Distancia (d): 400 m			Distancia (d): 750 m		
	Global	5 % peores		Global	5 % peores		Global	5 % peores	
		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs
0	0.80	0.1	2.3	0.65	0.6	2.7	0.68	5.7	2.5
5	0.67	0.7	2.0	0.55	0.8	2.4	0.56	5.0	2.2
10	0.73	4.3	1.9	0.48	2.2	2.0	0.57	6.3	2.1
15	1.05	14.3	1.8	0.54	5.8	1.9	0.60	9.2	2.0
20	1.93	31.2	1.5	0.67	10.9	1.6	0.70	13.1	1.9

Tabla 3.9: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 87$)

En el siguiente escenario que se analiza se mantiene baja la carga de los eNBs ($NUE_{eNB} = 54$), mientras que por el contrario se aumentan los UEs que se despliegan en los alrededores de los PeNBs ($NUE_{PeNB} = 117$), recogiendo los resultados en la Figura 3.19 y en la Tabla 3.10. De igual forma que en los dos escenarios previos, el porcentaje de descarte de TUs de los mUEs se reduce a medida que se incrementa el bias considerado en el criterio de selección de nodo, gracias a que se reduce el número de UEs que permanecen conectados a los eNBs. Respecto a los pUEs, puede verse en la Figura 3.19(b) que cuando los PeNBs son desplegados a una distancia $d = 200$ m, el porcentaje de descarte de TUs aumenta drásticamente cuando se incrementa el valor del bias. A pesar de que la carga de los eNBs no es muy alta en este escenario, los pUEs reciben

niveles interferentes elevados de su propio eNB, y por lo tanto tienen que emplear MCSs más bajos, necesitando un mayor número de RBs para satisfacer sus requisitos de QoS. A diferencia del escenario considerado en la Figura 3.17(b), ahora la carga de los PeNBs es elevada, y por lo tanto, como los pUEs emplean MCSs más bajos, no existen suficientes RBs disponibles en los PeNBs para satisfacer los requisitos de QoS de los pUEs. Por ello el porcentaje de descarte aumenta cuando se incrementa el bias, ya que se aumenta el número de UEs que permanecen conectados a los PeNBs. Por el contrario, cuando $d = 400$ m y $d = 750$ m, los niveles interferentes sufridos por los pUEs son más bajos, pudiendo recibir MCSs más elevados, y por lo tanto los PeNBs son capaces de satisfacer los requisitos de QoS de los pUEs, incluso para valores elevados de bias.

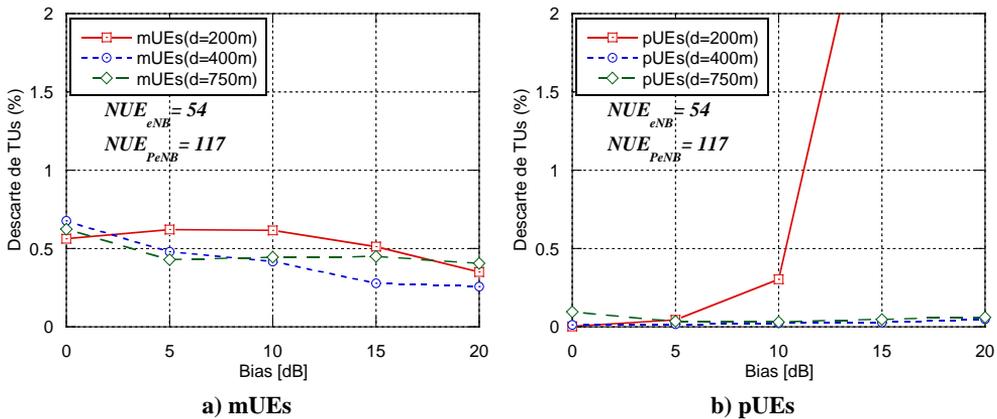


Figura 3.19: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 117$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)

En la Tabla 3.10 puede verse que cuando los PeNBs son desplegados a distancias $d = 400$ m y $d = 750$ m, aumentar el bias permite disminuir el porcentaje de descarte global del sistema, gracias a que se reducen los UEs que se conectan a los eNBs, y los PeNBs son capaces de satisfacer la alta carga de pUEs, debido a que la interferencia proveniente de los eNBs no es demasiado elevada al tener que dar servicio a un número no muy alto de mUEs. No obstante, teniendo en cuenta el porcentaje de TUs descartados de los peores UEs el valor de bias recomendado para este escenario sería 5 dB, ya que para el caso en el que los PeNBs se despliegan a una distancia $d = 200$ m, incrementar el bias no aporta ninguna ganancia debido a la degradación que sufren los pUEs adicionales. Sin embargo, si los PeNBs se despliegan más hacia el exterior de los eNBs, se podría incrementar el bias con el objetivo de reducir el porcentaje de descarte de TUs global.

Bias [dB]	Distancia (d): 200 m			Distancia (d): 400 m			Distancia (d): 750 m		
	Global	5 % peores		Global	5 % peores		Global	5 % peores	
		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs
0	0.45	0.1	1.8	0.39	0.2	2.2	0.30	2.0	1.8
5	0.45	0.8	1.7	0.24	0.3	1.4	0.17	0.8	1.2
10	0.49	4.1	1.5	0.18	0.5	1.2	0.16	0.7	1.3
15	1.88	23.5	1.1	0.12	0.6	0.9	0.17	1.1	1.3
20	2.46	26.4	0.8	0.12	1.1	0.8	0.17	1.5	1.1

Tabla 3.10: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 54$ y $NUE_{PeNB} = 117$)

Finalmente, en el último escenario que se analiza se considera una carga alta de tráfico en ambos tipos de nodo, desplegándose $NUE_{eNB} = 72$ usuarios de forma homogénea en cada eNB y $NUE_{PeNB} = 117$ usuarios en las cercanías de cada PeNB. Los resultados se recopilan en la Figura 3.20 y en la Tabla 3.11. Como en este escenario la cantidad de UEs distribuidos en los eNBs es alta, y además se concentra un elevado número de UEs en los alrededores de los PeNBs, puede verse en la Figura 3.20(a) que si no se aplica un bias al criterio de selección de nodo, la carga de tráfico en los eNBs se convierte en excesiva, no siendo capaz el sistema de satisfacer la $Cota_{desc}^{obj}$. Esta situación es especialmente grave cuando los PeNBs se despliegan a una distancia $d = 200$ m, ya que la cercanía al eNB provoca que sin la aplicación del bias solo una parte de los UEs concentrados en los alrededores de los PeNBs se conecten realmente a ellos. No obstante, aún con la aplicación de un bias al criterio de selección de nodo, el porcentaje de descarte de TUs de los mUEs se encuentra entorno al 1%, debido a que el número de mUEs es elevado.

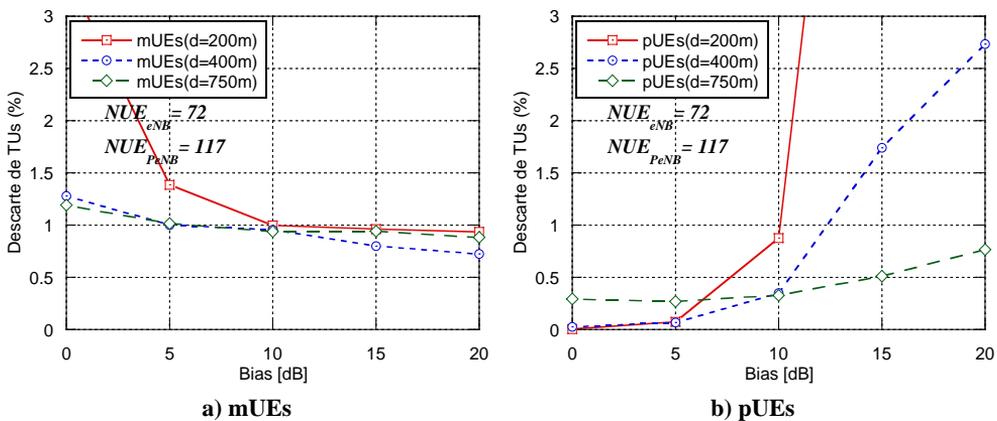


Figura 3.20: Porcentaje de TUs descartados para varios valores de bias, siendo $NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 117$ (FFRopa_24RBs) ($\theta = 30^\circ$)

Si se compara este escenario con el anterior (Figura 3.19(b)), ahora la carga de UEs de los eNBs es más alta, lo que provoca que los niveles interferentes recibidos por los pUEs sean mayores, incrementándose el porcentaje de descarte de TUs a medida que se incrementa el bias, tal y como se puede ver en la Figura 3.20(b). Por un lado, esto se debe a que los pUEs usan MCSs más bajos al observar peores niveles de SINR, necesitando una mayor cantidad de RBs para satisfacer sus requisitos de QoS, y provocando que los PeNBs no dispongan de suficientes RBs para satisfacer los requisitos de retardo de todos sus pUEs. Además, por otro lado, como los niveles interferentes recibidos de los eNBs son más elevados, los pUEs adicionales que se conectan a los PeNBs con la aplicación del bias al criterio de selección de nodo, observan niveles de SINR todavía más bajos, viendo degradadas sus prestaciones. En la Tabla 3.11 también puede observarse la necesidad de considerar un bias en el criterio de selección de nodo para reducir la carga de los eNBs, y reducir tanto el porcentaje de descarte global, como el porcentaje de descarte del 5% de peores mUEs. No obstante, como la interferencia sufrida por los pUEs es elevada, y además hay una gran concentración de UEs en los alrededores de los PeNBs, incrementar el valor de bias por encima de los 5 dB provoca un rápido incremento del porcentaje de TUs descartados por el 5% de peores pUEs. Por lo tanto, el valor de bias recomendado para este escenario serían 5 dB, con el objetivo de buscar un compromiso entre las prestaciones de los mUEs y las de los pUEs.

Bias [dB]	Distancia (d): 200 m			Distancia (d): 400 m			Distancia (d): 750 m		
	Global	5 % peores		Global	5 % peores		Global	5 % peores	
		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs		pUEs	mUEs
0	2.84	0.1	10.9	0.80	0.5	3.9	0.69	6.0	3.0
5	1.04	1.3	3.6	0.55	1.3	2.6	0.57	5.7	2.5
10	0.95	10.2	2.2	0.62	4.9	2.3	0.56	7.1	2.2
15	4.90	48.8	1.9	1.35	18.8	1.9	0.67	9.8	2.5
20	9.30	66.3	1.7	1.95	27.8	1.7	0.81	13.5	2.3

Tabla 3.11: Porcentaje de descarte de TUs global y del 5% de los peores UEs ($NUE_{eNB} = 72$ y $NUE_{PeNB} = 117$)

Los resultados muestran la necesidad de aplicar un bias al criterio de selección de nodo en escenarios con alta densidad de UEs, ya que, si se considera un criterio convencional, la diferencia en la potencia de transmisión de eNBs y PeNBs provoca que solo unos pocos UEs permanezcan conectados a los PeNBs, sobrecargando los eNBs, y degradando las prestaciones del sistema. En escenarios con una demanda de tráfico más reducida, la aplicación de un bias también es conveniente, ya que permite por un lado reducir el número de UEs que se conectan a los eNBs, mejorando las prestaciones de los mUEs, y además

por otro lado, también se consigue mejorar el aprovechamiento de los recursos frecuenciales planificados para los PeNBs. Merece la pena destacar que el aumento de las transmisiones por parte de los PeNBs, para dar servicio a un mayor número de pUEs no degrada significativamente las prestaciones de los mUEs, gracias a que la potencia de transmisión por RB de los PeNBs no es muy alta. La aplicación de un bias al criterio de selección de nodo permite por tanto mejorar las prestaciones de la red, reduciendo el porcentaje de descarte de TUs a nivel global.

No obstante, es necesario seleccionar cuidadosamente el valor de bias considerado, ya que los pUEs adicionales que se conectan a los PeNBs gracias al bias reciben un mayor nivel de RSRP del eNB, que del PeNB. Por lo tanto, como los PeNBs reutilizan los mismos RBs que los empleados por los eNBs, estos pUEs adicionales observan niveles de SINR bajos, especialmente en escenarios con alta demanda de tráfico en los eNBs, ya que la ocupación de RBs por parte de los eNBs es elevada, provocando fuertes niveles interferentes sobre los pUEs. A la hora de decidir el valor de bias adecuado, además de la carga de tráfico del sistema, otro aspecto muy importante a tener en cuenta es la distancia a la que están desplegados los PeNBs. En los resultados se ha visto que cuando las picoceldas son desplegadas cerca de los eNBs, los niveles de interferencia sufridos por los pUEs son mayores, degradándose sus prestaciones rápidamente a medida que se aumenta el valor del bias. Por otro lado, cuando los PeNBs se despliegan más lejos del eNB, aunque se incrementa la interferencia recibida de los eNBs adyacentes, especialmente en los RBs de la subbanda exterior de los dos sectores interferentes dominantes, se reduce notablemente la interferencia recibida del propio eNB, especialmente en los RBs de la subbanda interior preasignada al propio sector en el que está desplegado el PeNB. Además, también se reduce la interferencia sufrida por los pUEs en los RBs de la subbanda interior preasignada a los dos sectores restantes del eNB, pero que son asignados por el propio sector. Por lo tanto, los RBs disponibles en los PeNBs observan mejores condiciones de interferencia cuando los PeNBs son desplegados a más distancia de su propio eNB.

3.6 Conclusiones

En este capítulo se han propuesto varios esquemas de ICIC para despliegues de picoceldas, tomando como referencia los esquemas FFR y FFRopa aplicados a nivel de macrocelda. También se han analizado las prestaciones de un criterio de selección de nodo basado en el concepto CRE. En los resultados se ha comprobado que emplear el esquema FFRopa permite incrementar de forma notable el número de UEs a los que es capaz de proporcionar servicio cada PeNB. Como en el esquema FFRopa la subbanda interior se divide en tres

partes, cada una de las cuales se preasigna a un sector, se consigue reducir notablemente la variabilidad de la interferencia cross-layer que sufren los pUEs, ya que se mantienen más estables los RBs asignados por cada sector de los eNBs. Por lo tanto, la reducción de la flexibilidad en la asignación de los RBs de la subbanda interior del esquema FFR₁ frente al esquema FFR, es compensada gracias a reducir la variabilidad de la interferencia sufrida por los UEs, mejorando tanto las prestaciones de los mUEs, como las de los pUEs.

Los resultados numéricos también han mostrado que una mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los PeNBs proporciona una notable ganancia de prestaciones, de tal forma que el esquema FFR₁_24RBs es el esquema de ICIC que mejores resultados proporciona. Por lo tanto, la mayor disponibilidad de RBs permite aprovechar mejor la diversidad multicanal y multiusuario, compensando la degradación debida a la reducción de la potencia transmitida por RB de los PeNBs, así como los elevados niveles interferentes sufridos por los pUEs en los RBs que se van añadiendo a medida que se incrementa el reuso frecuencial. Además, también merece la pena destacar que el incremento del número de transmisiones por parte de los PeNBs, al disponer de una mayor cantidad de RBs, no tiene un impacto significativo en las prestaciones de los mUEs, gracias a que la potencia de transmisión de los PeNBs es baja, y gracias también a que el scheduling frecuencial de los eNBs es capaz de asignar a los mUEs que se encuentran cerca de los PeNBs recursos en los que observan buenas condiciones de canal.

Por otro lado, la aplicación de un criterio de selección de nodo convencional basado en el nivel de RSRP no permite aprovechar al máximo las ventajas de los despliegues de picoceldas, ya que debido a la diferencia en la potencia de transmisión entre eNBs y PeNBs, solo una parte de los UEs en los alrededores de los PeNBs se conectan realmente a ellos. Por lo tanto, se hace necesaria la aplicación de un bias al criterio de selección de nodo, especialmente en escenarios con alta demanda de tráfico, para permitir descargar parte de los UEs de los eNBs a las picoceldas, mejorando así la utilización de los RBs disponibles en las picoceldas. No obstante, como las picoceldas reutilizan los mismos recursos frecuenciales que son utilizados por los eNBs, es necesario escoger cuidadosamente el valor del bias considerado. En los resultados se ha visto que un aspecto determinante a la hora de escoger el valor del bias es la carga del sistema, tanto la de los PeNBs, como la de los eNBs, ya que cuando la carga de los eNBs es elevada, su utilización de los RBs disponibles es alta, provocando fuertes niveles interferentes sobre los pUEs. Otro aspecto muy relevante es la distancia a la que se despliegan las picoceldas respecto a su eNB, ya que se ha visto en los resultados que cuando las picoceldas se despliegan cerca de los eNBs, la interferencia sufrida por los pUEs es más agresiva, especialmente en los RBs de la subbanda interior que son asignados por el propio sector en el que

está desplegada la picocelda. En los diferentes escenarios que se han analizado en este capítulo se ha visto que valores de bias entre 5 y 10 dB permiten obtener un buen compromiso entre reducir el porcentaje de descarte de TUs global, sin empeorar demasiado el porcentaje de descarte de los pUEs que alcanzan las peores prestaciones.

Capítulo 4

Despliegues Heterogéneos con Relays: Esquemas Estáticos de ICIC

En el capítulo anterior se ha visto que los despliegues heterogéneos con picoceldas permiten mejorar las prestaciones de las redes convencionales homogéneas. En este capítulo continuamos analizando los despliegues heterogéneos, pero centrándonos en otro de los tipos de nodos de baja potencia considerados en el desarrollo de LTE como son los relays (RNs). La característica que hace a los RNs muy interesantes desde el punto de vista de los operadores es que su enlace backhaul con la red troncal es inalámbrico, reduciéndose significativamente sus costes de despliegue, al no ser necesario un enlace cableado. Los relays emplean la interfaz radio LTE para comunicarse con la macrocelda y acceder a la red troncal, implicando que los RNs tienen que compartir los recursos radio disponibles con los usuarios. Las comunicaciones a través de los RNs conllevan la definición de dos nuevos enlaces: enlace backhaul y enlace de acceso. El enlace backhaul hace referencia al enlace entre el RN y el eNB al que está conectado, al que se denomina DeNB (Donor evolved NodeB). El enlace entre un usuario conectado a la red a través de un RN (rUE) y el RN que le da servicio se denomina enlace de acceso. Por otro lado, el enlace entre el DeNB y uno de sus mUEs se conoce con el nombre de enlace directo. En la Figura 4.1 se representan los tres enlaces presentes en los despliegues heterogéneos con RNs.

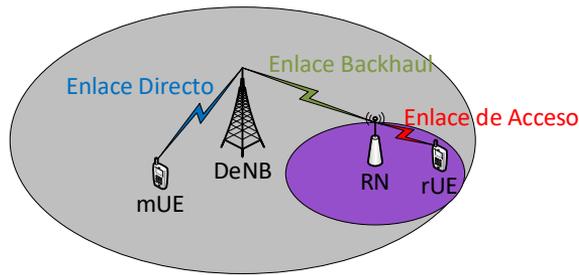


Figura 4.1: Enlaces presentes en los despliegues heterogéneos con RNs

En las especificaciones del 3GPP se definen varias clasificaciones de los relays considerando diferentes criterios [32]. Respecto al uso del espectro frecuencial por parte de los RNs, su operación se puede clasificar como outband o como inband. En el caso de RNs outband, los enlaces backhaul y de acceso operan en diferentes frecuencias portadoras. Mientras que en el caso de los RNs inband, los enlaces backhaul y de acceso comparten la misma frecuencia portadora. En ambos casos, el enlace backhaul puede operar en la misma frecuencia portadora que los enlaces directos. Respecto al conocimiento del RN en el lado del UE, los RNs pueden clasificarse como transparentes o no-transparentes. En los RNs transparentes, el UE no es consciente de si está conectado a la red a través de un RN o de si está conectado directamente a un DeNB. Por el contrario, en los RNs no-transparentes el UE sí que es consciente de si está conectado o no a la red a través de un RN. Por otro lado, un relay puede ser parte de su DeNB, o por el contrario controlar su propia celda. En el caso de que el RN es parte de su DeNB, el RN no tiene asociado un identificador de celda, y al menos una parte de los mecanismos de RRM son controlados por su DeNB. Si el RN controla su propia celda, el RN tiene un identificador de celda asociado, y el RN dispone de los mismos mecanismos de RRM que un DeNB.

Basados en estas clasificaciones se definen dos tipos principales de relays en LTE-A [32]: RNs “Tipo 1” y RNs “Tipo 2”. Los RNs “Tipo 1” son relays no-transparentes que controlan su propia celda, de tal forma que tienen asociado su propio identificador de celda y transmiten sus propios símbolos de referencia y sus propios canales de sincronización y control. Por el contrario, los RNs “Tipo 2” son relays inband transparentes a los UEs, y forman parte de su DeNB compartiendo el mismo identificador de celda. Como los RNs “Tipo 1” controlan su propia celda y disponen de todos los mecanismos de RRM, son más interesantes que los RNs “Tipo 2” desde el punto de vista de incrementar la capacidad de la red, ya que pueden tomar decisiones de scheduling y llevar a cabo la adaptación del enlace para sus enlaces de acceso de forma eficiente. Los RNs “Tipo 1” se subdividen en tres categorías: “Tipo 1”, “Tipo 1a” y “Tipo 1b”.

Los RNs “Tipo 1” y “Tipo 1b” son relays inband, mientras que los RNs “Tipo 1a” son outband.

Teniendo en cuenta la escasez del espectro frecuencial disponible y el elevado coste de las bandas licenciadas, los RNs que operan outband incrementan los costes de despliegue ya que se necesita una frecuencia portadora extra. Es por ello que generalmente se prefiere apostar por RNs que operan inband con el objetivo de reducir el espectro necesario. No obstante, los RNs no serán capaces de transmitir sus enlaces de acceso y recibir su enlace backhaul de forma simultánea en la misma banda frecuencial, a no ser que se consiga garantizar un aislamiento adecuado entre las señales entrantes y salientes. Además, este modo de operación es imposible cuando el RN dispone de una única cadena RF para cada banda frecuencial. Los RNs “Tipo 1” llevan a cabo la separación de los enlaces de acceso y backhaul aplicando TDM (Time Division Multiplexing), mientras que los RNs “Tipo 1b” operan inband gracias a utilizar sistemas de antenas complejas, pero caros, que proporcionan un aislamiento adecuado. Es por ello que los RNs “Tipo 1” se consideran a menudo como una alternativa atractiva y de menor coste que los RNs “Tipo 1b”.

Debido a las ventajas expuestas, en esta tesis nos centramos en RNs “Tipo 1”. Además, de la misma forma que en el capítulo anterior, se considera una comunicación con duplexado en frecuencia (FDD), centrándonos en el enlace descendente (DL). El despliegue de relays proporciona los medios para extender la cobertura, incrementar la capacidad de la red y mejorar la experiencia de los usuarios que se encuentran en zonas donde los niveles de señal útil recibidos son bajos, como pueden ser zonas de sombra, o zonas de los exteriores de las celdas [35, 36]. No obstante, el soporte de comunicaciones a través de RNs “Tipo 1” introduce varias restricciones y retos que deben ser gestionados para poder materializar esas ganancias potenciales. En cuanto a aspectos de las capas física y MAC, es necesario definir un nuevo canal de control físico para el DL de los relays (R-PDCCH: Relay Physical Downlink Control Channel) como aparece en la Figura 4.2, la operación del mecanismo de ARQ sobre el enlace backhaul debería ser lo más eficiente posible, la conmutación de la cadena RF de los RNs entre el enlace backhaul y los enlaces de acceso debería ser lo más rápida posible, así como otros retos [37].

En los RNs “Tipo 1” las transmisiones de los enlaces backhaul y de los enlaces de acceso se multiplexan en tiempo (TDM), por lo que la trama radio del DL se subdivide en subtramas de acceso y subtramas backhaul, tal y como se muestra en la Figura 4.2. En las subtramas backhaul los RNs reciben la información y datos de su DeNB, y no transmiten datos a sus rUEs. Por el contrario, en las subtramas de acceso los RNs no escuchan a su DeNB y transmiten los enlaces de acceso a sus rUEs (RA-PDSCH: Relay Access

Physical Downlink Shared Channel). Los enlaces directos se pueden asignar en ambos tipos de subtrama, y compiten por los recursos radio disponibles con los enlaces backhaul y de acceso.

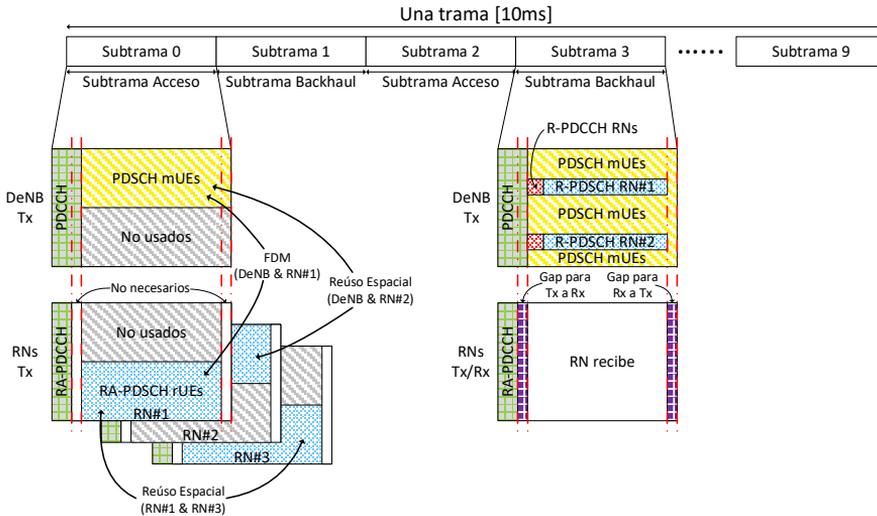


Figura 4.2: Estructura de trama. Ejemplo de reparto y reuso de recursos entre RNs y enlaces

Con la ayuda de los RNs se reduce la distancia entre el transmisor y el receptor, por lo que las transmisiones a los UEs conectados a los RNs (rUEs) en sus enlaces de acceso podrían potencialmente utilizar MCS más eficientes gracias a observar menores pérdidas de propagación, mejorando la eficiencia espectral. Además, como generalmente el despliegue de RNs es planificado por el operador de la red, se pueden asumir buenas condiciones de canal para los enlaces backhaul entre los DeNBs y sus RNs. Sin embargo, al tratarse de una comunicación en dos saltos, las transmisiones a los rUEs podrían consumir potencialmente más recursos radio que las transmisiones directas a los mUEs. Por lo tanto, asignar los recursos frecuenciales a los enlaces backhaul de una forma eficiente, así como emplear esquemas de reuso frecuenciale entre los enlaces de acceso de los RNs, son aspectos muy relevantes para conseguir reducir el overhead de los enlaces backhaul. Es por ello que las estrategias de RRM e ICIC para despliegues heterogéneos con relays se complican todavía más [38], respecto a las estrategias contempladas en el capítulo anterior para despliegues heterogéneos con picoceldas.

Con el objetivo de contrarrestar el overhead introducido por los enlaces backhaul, uno de los retos de los esquemas de ICIC debería ser que los RNs sean capaces de reutilizar para sus enlaces de acceso los mismos recursos frecuenciales que son usados por los DeNBs para asignar sus enlaces directos. Además, cuando sobre un DeNB se despliegan varios RNs es necesario definir

un esquema de multiplexado para sus enlaces backhaul, ya sea en tiempo (TDM), en frecuencia (FDM: Frequency Division Multiplexing) o un esquema híbrido, que puede aplicarse junto con esquemas de reuso frecuencial. Por lo tanto, se pueden considerar numerosas estrategias para asignar los recursos disponibles a los tres enlaces, como resultado de combinar un reparto de recursos, donde el tamaño de cada una de las particiones puede depender de las condiciones de carga, o de las características del tráfico y los requisitos de QoS, con un reuso frecuencial. El objetivo base de estas estrategias será asignar recursos ortogonales a aquellos enlaces que son interferentes entre sí, mientras que los enlaces que no se interfieren entre ellos podrán reutilizar los mismos recursos.

Por lo tanto, es necesario adaptar los esquemas de ICIC y RRM que se aplican sobre redes homogéneas al complejo escenario interferente que introducen los despliegues heterogéneos con RNs. El objetivo debería ser mejorar la eficiencia espectral del sistema incrementando el reuso frecuencial, pero asegurando siempre que los niveles interferentes entre los diferentes nodos y enlaces, y en los dos tipos de subtramas, se mantienen por debajo de unos umbrales aceptables. Además, también será necesario distribuir las subtramas disponibles en cada trama entre subtramas de acceso y subtramas backhaul, teniendo en cuenta que no todos los RNs tienen que seguir el mismo patrón.

Por otro lado, en el capítulo anterior se ha visto que el criterio de selección de nodo es otro de los aspectos que también tiene un impacto significativo en las prestaciones de los despliegues heterogéneos, debido a la diferencia en la potencia de transmisión entre macroceldas y nodos de baja potencia. Por lo tanto, también es necesario revisar los criterios de selección de nodo que se aplican sobre los despliegues heterogéneos con RNs, para favorecer que un mayor número de usuarios se beneficien de observar menores pérdidas de propagación con los RNs que se encuentren próximos.

En primer lugar, en este capítulo se expone una revisión del estado del arte sobre diferentes estrategias estáticas de coordinación de interferencias y gestión de recursos radio centradas en despliegues de relays. Posteriormente, y basándonos en esta revisión, se proponen diferentes alternativas de coordinación de interferencias estáticas para diferentes despliegues de RNs, que buscan coordinar los recursos empleados por ambas capas de la red, para maximizar el reuso frecuencial e incrementar la capacidad total de la red. Además, también se propone un esquema para multiplexar las transmisiones de los enlaces backhaul de los RNs. Finalmente se evalúan las prestaciones de las estrategias propuestas.

4.1 Estado del Arte

Para poner en contexto el trabajo considerado en este capítulo, en este apartado se presenta una revisión bibliográfica de diferentes estrategias encontradas en la literatura, centradas en una coordinación de interferencias y gestión de recursos radio estática para despliegues heterogéneos con RNs. Ya se ha visto en el capítulo anterior la importancia de considerar un esquema de ICIC entre DeNBs, ya que permite reducir los niveles interferentes sufridos por los UEs, especialmente para los UEs de las zonas exteriores, y además permite coordinar los recursos utilizados por los DeNBs con los recursos utilizados por los nodos de baja potencia. No obstante, será necesario revisar los esquemas de ICIC convencionales que se aplican sobre redes macrocelulares homogéneas, para considerar el nuevo escenario interferente introducido por el despliegue de RNs, así como la asignación de recursos radio para los enlaces backhaul. En la Figura 4.3 se representan los esquemas parcial FFR con subbanda exterior ortogonal (FFR) y soft FFR (SFR), junto con varias configuraciones de red que consideran las posiciones de los RNs sobre las celdas, así como qué celda es la que controla cada uno de los RNs.

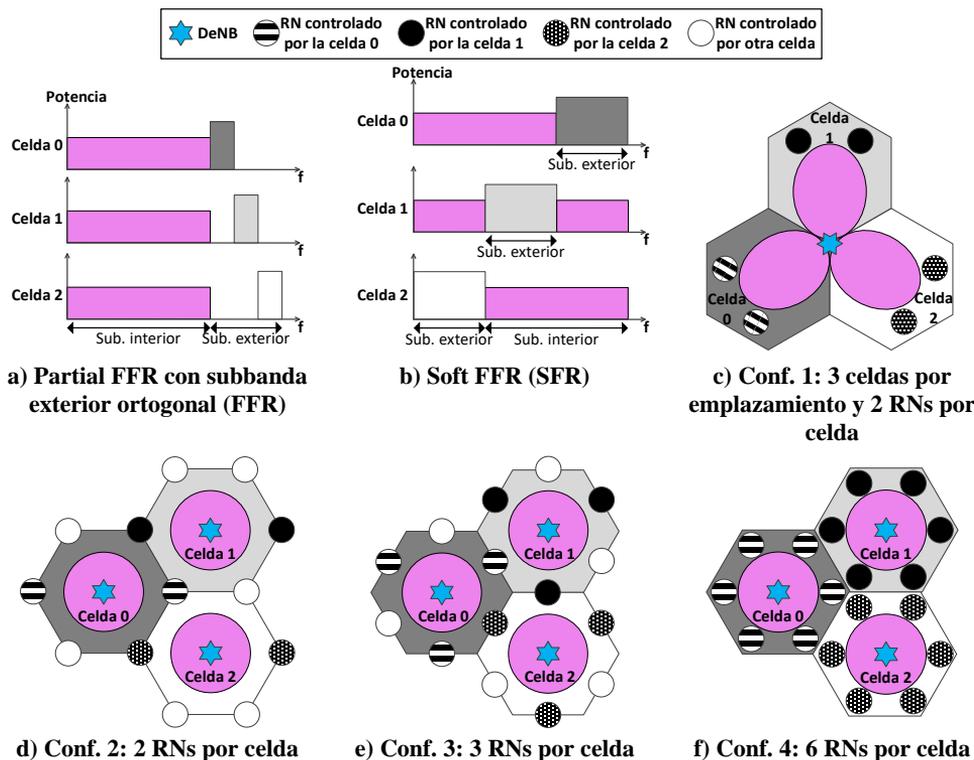


Figura 4.3: Esquemas FFR y SFR, junto con varias configuraciones de despliegue de RNs

En [39, 40] consideran un despliegue de red como el de la configuración 4 (Figura 4.3(f)). No aplican un esquema de ICIC entre DeNBs, y principalmente se centran en proponer varias estrategias de reparto de recursos para las subtramas de acceso, considerando diferentes factores de reuso frecuencial para los enlaces de acceso de los RNs. En el primer esquema propuesto en [39] el ancho de banda disponible en el sistema se divide en seis partes, de tal forma que cada una de esas partes es asignada a los enlaces de acceso de un RN de la celda, mientras que los DeNBs se quedan sin transmitir durante las subtramas de acceso. En este esquema no hay reuso de recursos dentro de cada DeNB, proporcionando un factor de reuso frecuencial (FRF: Frequency Reuse Factor) entre los enlaces de acceso de los RNs de seis ($FRF = 6$). Basado en esta estrategia en [40] se propone el esquema denominado PF7, que se basa en dividir el ancho de banda disponible en el sistema en siete partes, de tal forma que una de estas partes es utilizada por los DeNBs para asignar sus enlaces directos, mientras que cada una de las seis partes restantes es asignada a los enlaces de acceso de un RN de la celda (Figura 4.4(a)).

Tanto en el esquema $FRF = 6$, como en el esquema PF7, se lleva a cabo un reparto ortogonal de recursos entre los diferentes enlaces presentes dentro de cada DeNB. Por un lado, este reparto permite que no se genere interferencia cross-layer entre DeNBs y RNs. Sin embargo, esta mejora de las condiciones de interferencia se obtiene a costa de reducir los recursos disponibles para los enlaces directos, pudiendo comprometer las prestaciones de los mUEs. Por otro lado, como los RNs pertenecientes a un DeNB asignan sus enlaces de acceso en recursos frecuenciales diferentes, se reduce significativamente la interferencia co-layer, ya que además los RNs de los DeNBs adyacentes que utilizan los mismos recursos se encuentran bastante lejos. No obstante, esta mejora se obtiene de nuevo a costa de reducir los recursos frecuenciales disponibles en los nodos de la red.

Para tratar de incrementar la eficiencia espectral, en [39] proponen el esquema $FRF = 3$, que consiste en dividir el ancho de banda en tres partes, asignando una parte a los enlaces de acceso de cada RN, de tal forma que los dos RNs de la celda que reutilizan los mismos recursos frecuenciales se encuentran lo más alejados posible, tal y como se representan en la Figura 4.4(b). Basado en esta estrategia de reuso entre los enlaces de acceso, en [40] proponen el esquema PR (Figura 4.4(b)), en el que el ancho de banda se divide en cuatro partes, siendo una de esas partes asignadas a los enlaces directos del DeNB, mientras que las tres partes restantes son reutilizadas por los enlaces de acceso de la misma forma que en el esquema $FRF = 3$. Como el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces de acceso sigue siendo ortogonal, no se genera interferencia cross-layer. Sin embargo, como se considera reuso de recursos entre los enlaces de acceso de RNs pertenecientes al mismo DeNB, la

interferencia co-layer recibida por los rUEs es más alta que para los esquemas $FRF = 6$ y PF7. No obstante, el reparto de recursos de los esquemas $FRF = 3$ y PR permite alejar los RNs que reutilizan los mismos recursos frecuenciales, tanto los pertenecientes a la misma celda, como los pertenecientes a las celdas adyacentes, minimizando la interferencia co-layer.

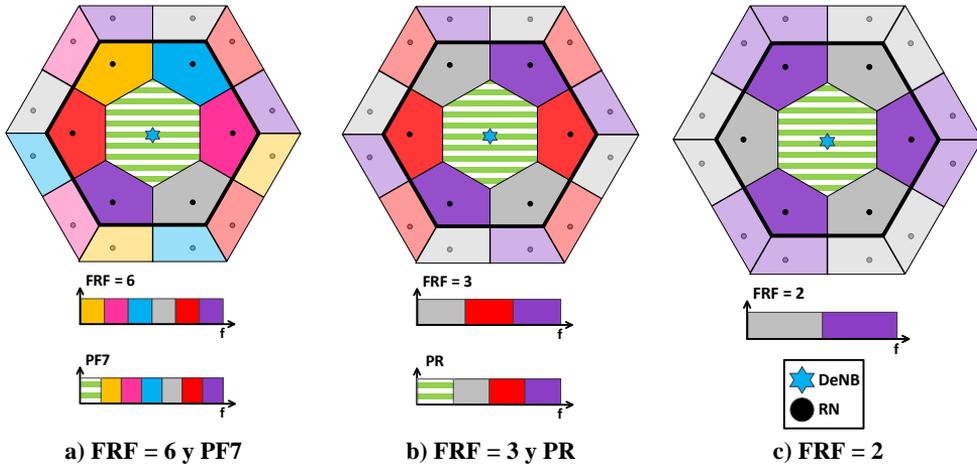


Figura 4.4: Esquemas de RA para las subtramas de acceso con diferentes factores de reuso frecuencial

Finalmente, en [39] incrementan todavía más el reuso frecuencial entre los enlaces de acceso de los RNs con el esquema $FRF = 2$, en el que el ancho de banda del sistema se divide en dos partes, las cuales son asignadas a los enlaces de acceso de los RNs de forma alterna, tal y como se muestra en la Figura 4.4(c). La interferencia co-layer generada entre los enlaces de acceso de los RNs es bastante más agresiva en este esquema, debido especialmente a que los RNs adyacentes de las celdas vecinas utilizan los mismos recursos frecuenciales. Los esquemas $FRF = 6$ y PF7 son los que proporcionan mejores niveles de SINR a los UEs gracias al reparto ortogonal de recursos entre enlaces directos y de acceso. Sin embargo, son los esquemas que consideran reuso frecuencial ($FRF = 3$, PR y $FRF = 2$) los que permiten obtener mejores eficiencias espectrales, ya que, aunque los niveles interferentes sean más altos, la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales permite mejorar las prestaciones de la red.

En ambos trabajos [39, 40] consideran que los enlaces backhaul de los RNs utilizan parte de los recursos asignados a los DeNBs, pero no realizan una propuesta específica para multiplexar estos enlaces, ni consideran esquemas de reuso frecuencial sobre ellos. Además, tampoco analizan el impacto que tiene el overhead de los enlaces backhaul sobre las prestaciones de la red. Por otro lado, aunque estas estrategias de reuso frecuencial para los enlaces de acceso permiten mejorar la eficiencia espectral del sistema, no se está considerando un esquema

de ICIC entre DeNBs que permita coordinar los recursos empleados por los diferentes enlaces.

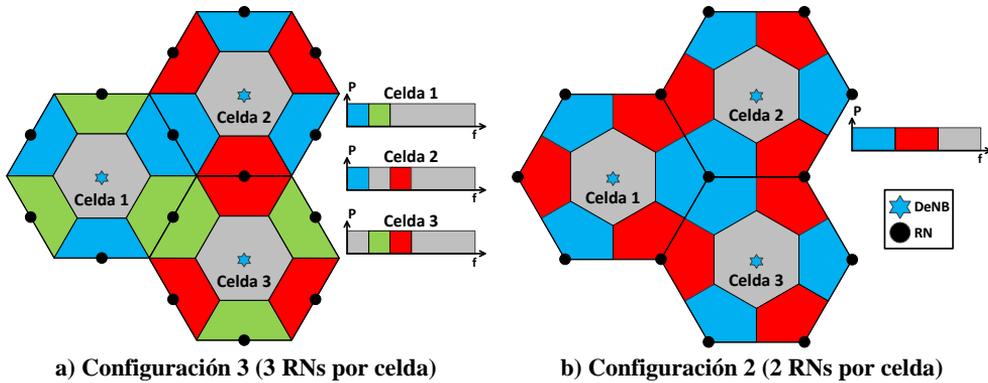


Figura 4.5: Esquemas de RA para las subtramas de acceso para las configuraciones 2 y 3

La estrategia propuesta para la subtrama backhaul en [41–43] se basa en el esquema SFR, y considera a los RNs como usuarios exteriores virtuales, de tal forma que la subbanda exterior de recursos se asigna a los enlaces backhaul, y la subbanda interior es asignada a los enlaces directos. El uso de la subbanda exterior del esquema SFR para los enlaces backhaul permite una coordinación con los enlaces backhaul de las celdas vecinas, ofreciendo buenas condiciones de interferencia a estos enlaces. Sin embargo, esta propuesta no considera un reuso frecuencial para las subtramas backhaul, realizando un reparto ortogonal de recursos entre enlaces directos y backhaul. Por otro lado, las estrategias consideradas para las subtramas de acceso en estos trabajos no se basan en el esquema SFR. En [41] consideran la configuración de despliegue 3, en la que cada RN está ubicado entre dos celdas, pero de tal forma que cada celda solo controla tres RNs, como se representa en la Figura 4.3(e). En las subtramas de acceso, el ancho de banda del sistema se divide en dos partes. Una de ellas se reserva para los enlaces directos y es común a todos los DeNBs de la red. La otra parte se subdivide en tres subbandas, y considerando un clúster de tres celdas, cada subbanda es asignada a los enlaces de acceso de los RNs controlados por una de las celdas. Por lo tanto, dos de estas tres subbandas son asignadas a los enlaces de acceso en cada celda, mientras que la subbanda restante se asigna a los enlaces directos, tal y como se representa en la Figura 4.5(a). La propuesta de asignar las subbandas de recursos planificadas para los enlaces de acceso de una celda de forma alterna es similar al esquema $FRF = 2$ propuesto en [39], pero en este caso adaptada a la configuración de despliegue 3. Sin embargo, es necesario destacar que la propuesta no considera el reuso de recursos frecuenciales dentro del mismo DeNB. Es decir, que la subbanda asignada a los enlaces de acceso de

los RNs de cada celda es compartida por los tres RNs, y un mismo RB solo puede ser asignado a los enlaces de acceso de uno de los RNs de la celda.

Los mismos autores proponen en [42] la estrategia representada en la Figura 4.5(b) para las subtramas de acceso. En este caso consideran la configuración de despliegue 2 (Figura 4.3(d)), en la que cada RN está ubicado entre tres celdas, pero de tal forma que realmente cada celda controla dos RNs. El ancho de banda del sistema se divide en tres partes. Una de ellas es asignada a los enlaces directos y es común a todos los DeNBs. Mientras que las dos partes restantes son asignadas a los enlaces de acceso de los RNs de forma alterna, como en el esquema $FRF = 2$ [39]. No obstante, y de igual forma que en [41], la propuesta no considera el reuso de recursos frecuenciales dentro del mismo DeNB. Las estrategias propuestas en [41, 42] para las subtramas de acceso permiten realizar un reparto de recursos coordinado entre enlaces directos y enlaces de acceso, pero no aplican reuso frecuencial entre los diferentes enlaces, comprometiendo la ganancia del despliegue de RNs.

En [43] consideran la configuración 1 (Figura 4.3(c)), pero desplegando cuatro RNs en cada celda en lugar de dos. Para las subtramas de acceso proponen una estrategia similar a la propuesta en [42], de tal forma que dividen el ancho de banda del sistema en tres partes, planificando una de ellas para los enlaces directos de las celdas, mientras que las dos partes restantes son asignadas a los enlaces de acceso de los RNs de forma alterna. Sin embargo, en este caso sí que se permite un reuso de recursos entre los RNs que reciben la misma subbanda frecuencial, de forma similar al esquema $FRF = 2$ [39]. Las propuestas consideradas en [41–43] para las subtramas de acceso presentan ideas similares a las propuestas en [39, 40] pero adaptadas a diferentes configuraciones de despliegue de RNs, buscando asignar recursos frecuenciales diferentes entre RNs vecinos, y aplicando reuso entre los enlaces de acceso de los RNs de la misma celda en el caso de [43]. Sin embargo, no consideran un esquema de ICIC entre DeNBs que permita incrementar el reuso frecuencial, mediante la coordinación de los recursos empleados por los diferentes enlaces.

En [44, 45] proponen estrategias basadas en el esquema SFR para las subtramas de acceso. Sin embargo, en ninguno de los dos trabajos realizan una propuesta para las subtramas backhaul, ni tienen en cuenta el impacto real del overhead de los enlaces backhaul en las prestaciones de la red. En [44] consideran la configuración de despliegue 4 (Figura 4.3(f)), y la estrategia de ICIC propuesta se basa en el esquema SFR, de tal forma que la subbanda interior se asigna a los enlaces directos, mientras que la subbanda exterior es utilizada por los RNs para sus enlaces de acceso. La subbanda exterior de los DeNBs se divide en tres partes, y se define también una máscara de potencia de dos niveles en los RNs. La subbanda exterior de cada RN está formada por una de las partes

de la subbanda exterior de su DeNB, y el RN que reúsa la misma parte como subbanda exterior es el que se encuentra más alejado dentro del DeNB. Por lo tanto, este reparto de recursos para las subbandas exteriores de los RNs sigue el mismo planteamiento que los esquemas FRF = 3 [39] y PR [40] (Figura 4.4(b)). Como subbanda interior, cada RN puede asignar las dos partes restantes de la subbanda exterior de su DeNB.

Como los RNs utilizan para sus enlaces de acceso la subbanda exterior de su DeNB siguiendo el esquema SFR, los RNs de los DeNBs vecinos emplean recursos frecuenciales diferentes, reduciendo la interferencia co-layer. Sin embargo, como contrapartida, aunque en cada DeNB se considera un reparto ortogonal de recursos entre enlaces directos y enlaces de acceso, los rUEs reciben interferencia cross-layer de las subbandas interiores de los DeNBs vecinos. Por otro lado, todos los RNs del DeNB reutilizan por completo la subbanda exterior del DeNB. Sin embargo, al definir dos niveles en la máscara de potencia de los RNs, y separar los RNs que reutilizan los mismos recursos frecuenciales en su subbanda exterior, evitan que las condiciones de interferencia de los rUEs sean demasiado agresivas. No obstante, a pesar de que el esquema propuesto se basa en SFR, e incorpora reuso frecuencial entre los enlaces de acceso de los RNs, el reparto de recursos entre enlaces directos y de acceso sigue siendo ortogonal, reduciendo los recursos disponibles para los enlaces directos.

La estrategia de ICIC propuesta en [45] para las subtramas de acceso también se basa en SFR, pero en este caso consideran la configuración de despliegue 1 (Figura 4.3(c)). Además, todo el ancho de banda de la red es asignado a los enlaces directos, mientras que los enlaces de acceso de cada uno de los dos RNs son asignados en la subbanda exterior de uno de los DeNBs adyacentes, tal y como se representa en la Figura 4.6. Por lo tanto, no se considera un reparto ortogonal entre enlaces directos y enlaces de acceso, si no que los enlaces de acceso reutilizan los recursos frecuenciales de la subbanda interior de su propio DeNB. Este reparto de recursos permite que RNs adyacentes empleen recursos frecuenciales diferentes, minimizando la interferencia co-layer. Sin embargo, los enlaces de acceso son interferidos tanto por el propio DeNB, como por los DeNBs adyacentes. Además, uno de los DeNBs adyacentes utiliza los mismos recursos que los enlaces de acceso del RN para su subbanda exterior, por lo que la interferencia cross-layer es bastante agresiva. Por lo tanto, esta propuesta consigue incrementar el reuso frecuencial, pero a costa de empeorar las condiciones de interferencia de los rUEs.

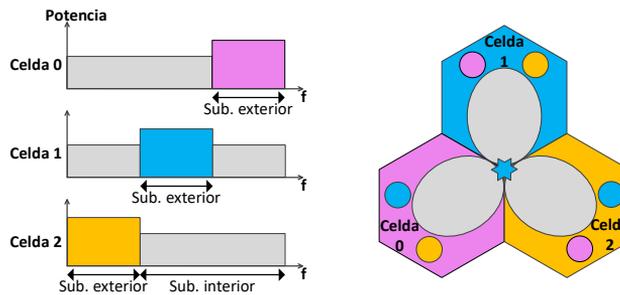


Figura 4.6: Esquema de RA para la subtrama de acceso basado en SFR (configuración 1)

Los trabajos que se encuentran en la literatura centrados en esquemas de RRM e ICIC para despliegues heterogéneos con RNs tienen a menudo varias limitaciones. La mayor parte de estos trabajos no consideran una propuesta para los enlaces backhaul, o no consideran una propuesta optimizada asumiendo un reparto ortogonal entre enlaces directos y enlaces backhaul. Sin embargo, el enlace backhaul podría ser el cuello de botella de las comunicaciones a través de los RNs si no se diseña un esquema de RRM para las subtramas backhaul de forma adecuada. Además, en pocos trabajos se considera de forma realista el overhead introducido por los enlaces backhaul, por lo que las ganancias estimadas para los despliegues con RNs serían demasiado optimistas. Por otro lado, muchos trabajos no consideran el impacto que tiene el esquema de ICIC empleado entre macroceldas. Y es que, esquemas de ICIC que proporcionan prestaciones similares en redes homogéneas convencionales, pueden ofrecer diferentes soluciones de RRM para despliegues heterogéneos con RNs. El objetivo será tratar de coordinar los recursos empleados por los enlaces directos con los recursos asignados a los enlaces introducidos por los RNs, buscando incrementar el reuso frecuencial.

Los trabajos de la literatura analizan las prestaciones de estrategias de ICIC específicas. Sin embargo, es difícil cuantificar las mejoras que introducen respecto a otras propuestas. En este capítulo comparamos diferentes estrategias de RRM para despliegues heterogéneos con RNs, para determinar el equilibrio entre las restricciones impuestas por el esquema de ICIC empleado, y el throughput del sistema. Un esquema de ICIC estricto permite reducir la interferencia generada, sin embargo, reducir la disponibilidad de recursos frecuenciales puede degradar las prestaciones del sistema. Por ello es necesario analizar ese compromiso entre las restricciones impuestas por el esquema de ICIC y el throughput alcanzado por la red.

Finalmente, otro de los aspectos que también cobra especial relevancia para optimizar las prestaciones de los despliegues heterogéneos es el criterio de selección de nodo. En el capítulo anterior se ha visto que una estrategia

ampliamente extendida para incrementar el número de UEs que se conectan a los nodos de baja potencia es el criterio CRE, que se lleva a la práctica aplicando un bias positivo al nivel de RSRP de los nodos de baja potencia. El criterio CRE también se ha considerado como una estrategia válida para aumentar la cantidad de usuarios que permanecen conectados a los RNs, tal y como consideran en [46].

4.2 Modelo del sistema con despliegue de relays

Como en el capítulo anterior, se han considerado celdas trisectorizadas con geometría hexagonal, en las cuales, la estación base (DeNB) se despliega en el centro de la celda, y los relays (RN) se despliegan alrededor de la estación base, formando un círculo, tal y como se refleja en la Figura 4.7. El DeNB se representa mediante una estrella azul, y los RNs mediante un círculo negro. Se han considerado dos configuraciones de despliegue de relays: en la primera se despliegan dos relays en cada sector (Figura 4.7(a)), y en la segunda se aumenta el número de relays desplegados a cuatro relays en cada sector (Figura 4.7(b)). Cada RN es desplegado en una posición (d_i, θ_i) , donde d_i representa la distancia entre el RN $_i$ y el DeNB, y θ_i representa el ángulo entre la dirección formada por el DeNB y el RN $_i$, y la frontera entre sectores más cercana al RN $_i$.

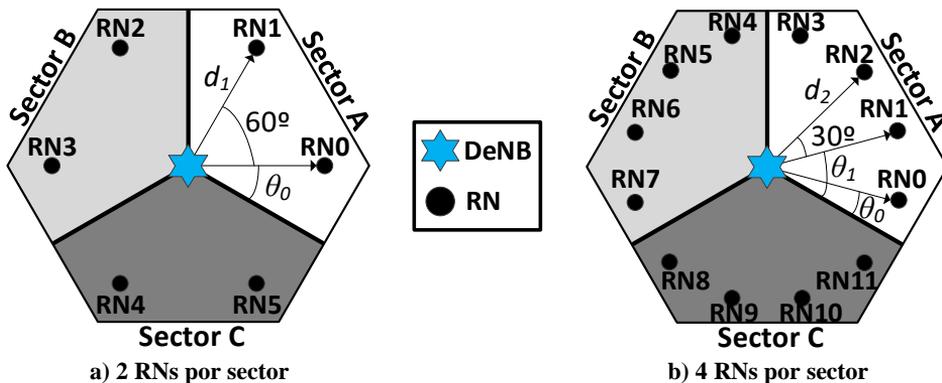


Figura 4.7: Configuraciones de despliegue de relays

El trabajo se ha centrado en relays inband half-duplex “Tipo 1”, sobre la estructura de trama FDD. De la misma forma que en el capítulo anterior, el trabajo se centra en las transmisiones en el enlace DL. Las subtramas de acceso y backhaul se multiplexan en tiempo (TDM), y se alternan para cada relay, tal y como se representa en la Figura 4.8.

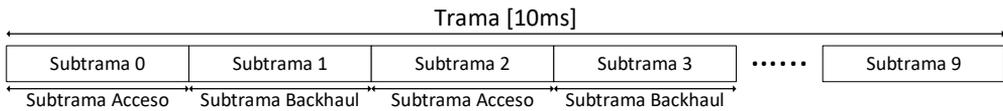


Figura 4.8: Estructura de Trama

Siguiendo las recomendaciones para el desarrollo de LTE, y tal y como se ha comentado en los capítulos anteriores, los recursos frecuenciales del sistema se dividen en RBs, los cuales representan la asignación mínima de recursos. Además, en este capítulo, con el objetivo de poder explicar de una forma más clara las diferentes estrategias de asignación de recursos, el ancho de banda del sistema se divide en 9 grupos de RBs (GrRB), tal y como se muestra en la Figura 4.9.

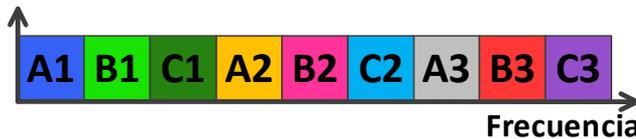


Figura 4.9: Distribución de los recursos frecuenciales en grupos (GrRB)

4.3 Esquemas preliminares de ICIC y RA

En este apartado se describen estrategias preliminares de asignación de recursos y control de interferencias para despliegues relays, basadas en estrategias encontradas en la literatura, que serán consideradas como punto de referencia para proponer estrategias de RRM, buscando incrementar el reuso frecuencial para conseguir un uso más eficiente del espectro, y buscando como objetivo final mejorar las prestaciones del sistema.

4.3.1 Esquemas PFx

En primer lugar se van a considerar los esquemas PF7, PF4 y PF3, basados en [39, 40], y representados en la Figura 4.10. Sobre las estrategias de RRM propuestas en [39, 40] se han realizado pequeñas modificaciones, en relación a la cantidad de recursos asignados a los relays y a los mUEs. Además, también se proponen dos opciones para distribuir los recursos frecuenciales en las subtramas backhaul, las cuales no están consideradas en [39, 40].

En la estrategia PF7 (Figura 4.10(a)) el ancho de banda del sistema se divide en siete partes. Una de las partes se reserva para los enlaces directos del DeNB e incluye tres grupos de recursos (3 GrRBs). Las seis partes restantes se reservan para los enlaces de acceso, asignando una parte (1 GrRB) a cada relay. Por lo tanto, en la estrategia PF7 un RB no puede ser reutilizado en el DeNB y sus RNs

asociados, con lo que no existe interferencia entre ellos. Con el objetivo de incrementar la eficiencia espectral, en la estrategia PF4 (Figura 4.10(b)) el ancho de banda se divide en cuatro partes. Una de ellas (6 GrRBs) se reserva para los enlaces directos del DeNB, mientras que las tres partes restantes se reutilizan en los enlaces de acceso de los RNs. Cada una de estas tres partes incluye 1 GrRB y es reutilizada por dos RNs. De cara a asignar estos tres grupos de recursos, el objetivo que se persigue es separar lo máximo posible los RNs que emplean el mismo conjunto de recursos, para minimizar la interferencia generada entre ambos. La estrategia PF4 permite incrementar la cantidad de recursos que son reservados para los enlaces directos del DeNB respecto a la estrategia PF7, pero a costa de incrementar la interferencia co-layer entre RNs, especialmente entre RNs pertenecientes a DeNBs adyacentes. El siguiente paso, de cara a seguir incrementando la eficiencia espectral del sistema, es la estrategia PF3 (Figura 4.10(c)), en la que el ancho de banda se divide en tres partes. La parte que se reserva para los enlaces directos del DeNB incluye 7 GrRBs, mientras que cada una de las dos partes restantes incluye 1 GrRB. Con la estrategia PF3 se añaden recursos adicionales a los enlaces directos, pero esto implica que tres RNs pertenecientes al mismo DeNB tienen que reutilizar los mismos recursos frecuenciales. Además, la interferencia co-layer entre RNs pertenecientes a DeNBs adyacentes se incrementa considerablemente.

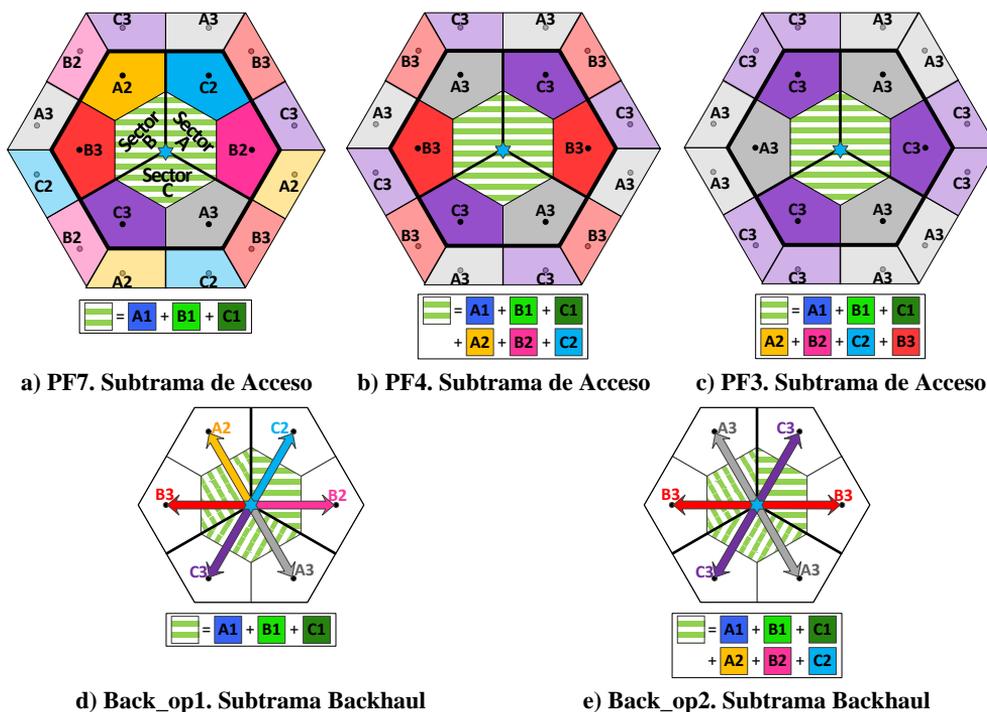


Figura 4.10: Esquemas PFx de RA (2 RNs por sector)

Merece la pena destacar que no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Esto permite limitar la interferencia inter-sector y que los enlaces directos dispongan de recursos con condiciones de interferencia aceptables. En los esquemas PFX (con $x = 7, 4$ o 3), tanto el DeNB como los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles, es decir, no se consideran diferentes subbandas de recursos, con diferentes niveles de potencia de transmisión.

En [39, 40] se analiza la capacidad, sin embargo, el overhead introducido por los enlaces backhaul no se incluye en el análisis, y por lo tanto, los resultados están fuertemente limitados. De hecho, en [39, 40], en lugar de las estrategias que se acaban de describir, los DeNBs siempre asignan la misma capacidad a los enlaces directos, mientras que el número de GrRBs asignados a cada RN aumenta a medida que el número de particiones del ancho de banda se reduce. Por lo tanto, la capacidad requerida por los enlaces backhaul, especialmente en la estrategia PF3, limita fuertemente la ganancia teórica obtenida en [39, 40]. En las estrategias que proponemos, el incremento en el reuso frecuencial permite aumentar la capacidad reservada para los enlaces directos. En cualquier caso, aunque la capacidad requerida por los enlaces backhaul sea siempre la misma, es aconsejable optimizar su distribución de recursos. Para asignar los recursos frecuenciales en las subtramas backhaul se proponen dos opciones (Figura 4.10(d) y Figura 4.10(e)). La capacidad de los enlaces backhaul se mantiene siempre proporcional a la capacidad reservada para los enlaces de acceso de los seis relays. En la estrategia Back_op1, el ancho de banda se divide en siete partes. Una de ellas se reserva para los enlaces directos (3 GrRBs), y las seis restantes se reservan para los enlaces backhaul, asignando una parte (1 GrRB) a cada RN. Por lo tanto, en esta estrategia de RA no existe interferencia intracelular. Continuando con la idea de incrementar el reuso frecuencial, en la estrategia Back_op2 el ancho de banda se divide en cuatro partes. Una de las partes se reserva a los enlaces directos (6 GrRBs), mientras que cada una de las tres partes restantes es reutilizada para dos RNs. Esta estrategia permite incrementar el número de recursos asignados a los enlaces directos, y con el objetivo de minimizar la interferencia inter-sector generada, los dos RNs que reutilizan el mismo GrRB para sus enlaces backhaul, son los localizados en los extremos opuestos de la celda. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas PFX para las subtramas de acceso, en las estrategias propuestas para las subtramas backhaul no se permite que un RB reservado para los enlaces directos se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en dos sectores pertenecientes a la misma celda. Asimismo, el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

4.3.2 Esquemas basados en SFR inspirados en propuestas de la literatura: SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2

En la Figura 4.11 se representan dos esquemas de asignación de recursos para las subtramas de acceso, inspirados en las ideas propuestas en [44] (SFR_bm_op1) y [45] (SFR_bm_op2). Ambos esquemas de asignación de recursos se basan en un esquema SFR, o alternativamente, en un esquema SFR con sectorización estricta en la subbanda exterior, representados en la Figura 4.12. En estos esquemas SFR se han introducido varias modificaciones relacionadas con el ordenamiento en la asignación de los recursos de la subbanda interior propuesto en el esquema FFRopa (subapartado 2.3.1). Y es que en el esquema SFR representado en la Figura 4.12(a), ambas subbandas de recursos, tanto la interior como la exterior, se dividen en tres partes, de tal forma que cada una de las partes se planifica principalmente para uno de los sectores de la celda. Los usuarios reciben asignaciones en primer lugar en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio. No obstante, cuando un sector ocupa todos sus RBs prioritarios, comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda, seleccionando el sector que tenga menor ocupación. En el esquema SFR representado en la Figura 4.12(b) se aplica el mismo planteamiento, con la diferencia de que se aplica una sectorización estricta en las subbandas exteriores de recursos. La potencia de transmisión del DeNB en la subbanda exterior es más alta que la potencia de transmisión empleada en la subbanda interior.

Ya se ha visto en el capítulo anterior que esta planificación de RBs para los diferentes sectores del DeNB permite reducir la variabilidad de la ICI, y además permite coordinar los recursos frecuenciales asignados por los DeNBs, con los asignados por los nodos de baja potencia. Conviene destacar que en ambos esquemas SFR, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en dos sectores pertenecientes a la misma celda, con el objetivo de limitar la interferencia inter-sector.

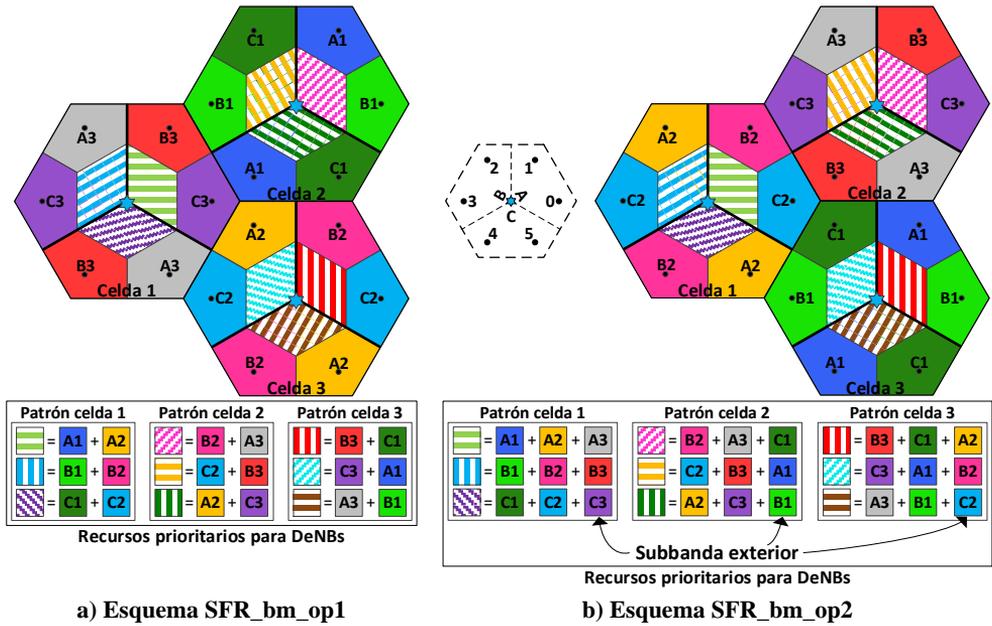


Figura 4.11: RA para DeNBs (a rayas) y RNs (sólido) en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

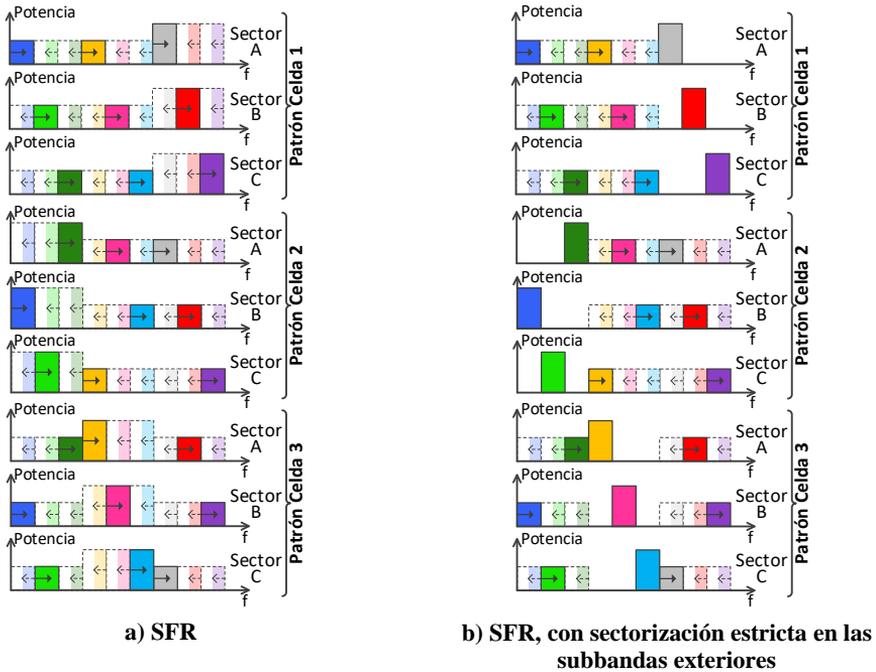


Figura 4.12: Ordenación en la asignación de recursos para los DeNBs, con asignaciones prioritarias entre sectores

El esquema SFR_bm_op1 se basa en la propuesta presentada en [44] con una serie de variantes, y se representa en la Figura 4.11(a). En [44] los autores proponen una estrategia para las subtramas de acceso basada en SFR. Los DeNBs sirven a sus mUEs utilizando los recursos de la subbanda interior, mientras que la subbanda exterior de cada celda se reserva para los enlaces de acceso de sus RNs, dividiéndola en 3 partes. Tomando como base esta estrategia, en el esquema SFR_bm_op1 los DeNBs no transmiten en la subbanda exterior de recursos, y dicha subbanda se divide en 3 partes, asignando cada una de estas partes a los enlaces de acceso de un RN, siguiendo un reparto en rotación. Al contrario que en el esquema PF4, y debido a que se definen tres patrones de celda diferentes, los RNs pertenecientes a celdas vecinas asignan sus enlaces de acceso en recursos frecuenciales diferentes, reduciéndose la interferencia co-layer.

El esquema SFR_bm_op2 es una adaptación del esquema presentado en [45], donde los autores consideran la configuración de despliegue 1 (Figura 4.3(c)), aplicándose una solución basada en SFR. Cada relay asigna recursos a sus rUEs pertenecientes a la subbanda exterior de una celda adyacente, por lo que reutiliza una parte de la subbanda interior de su propia celda. En el esquema SFR_bm_op2 (Figura 4.11(b)) se ha adaptado esta idea a nuestra configuración de red. El reúso unidad a nivel de sector considerado en [45] podría reducir la eficiencia del sistema, a no ser que se apliquen esquemas de coordinación de interferencia inter-sector, para poder asignar recursos frecuenciales con niveles aceptables de interferencia a los usuarios situados en las fronteras entre sectores, tal y como se vio en [47]. Por lo tanto, en el esquema SFR_bm_op2 se ha considerado un reúso unidad a nivel de celda. Los RNs utilizan para sus enlaces de acceso la subbanda exterior de recursos de un DeNB adyacente. Las subbandas exteriores se dividen en 3 partes y cada relay emplea una de las tres partes, siguiendo el mismo reparto en rotación que el aplicado en el esquema SFR_bm_op1 y en el esquema PF4. Si por ejemplo se toman como referencia los relays pertenecientes a la celda 1, estos relays emplearán la subbanda exterior de la celda 3. Los rUEs podrían recibir fuertes interferencias en los recursos pertenecientes a la subbanda exterior de las celdas adyacentes. Por lo tanto, en este caso la elección más adecuada para los DeNBs es el esquema SFR con sectorización estricta en las subbandas exteriores, siguiendo el esquema de asignación mostrado en la Figura 4.12(b). La sectorización estricta en la subbanda exterior permite coordinar los recursos reservados para los RNs, con los recursos de la subbanda exterior empleados por los sectores de los DeNBs adyacentes. Entre todos los posibles recursos que pueden ser asignados a cada RN, se excluyen los RBs que pueden ser asignados potencialmente por el sector que le da servicio. El objetivo es reducir la interferencia recibida por los rUEs, proveniente de su propio DeNB. Además, el GrRB asignado a cada RN evita la

interferencia cross-layer de los DeNBs adyacentes, ya que los sectores que provocan las interferencias dominantes utilizan potencialmente otros GrRBs. Por ejemplo, si nos centramos en el RN0 de la celda 1, se le podría asignar la subbanda exterior de la celda 3, es decir, los grupos A2, B2 o C2. Sin embargo, se excluye el grupo A2, ya que este grupo de RBs es empleado prioritariamente por su propio sector. Los grupos B2 y C2 no son utilizados prioritariamente por el sector C de la celda 2 en su subbanda interior, sin embargo, el grupo B2 pertenece a la subbanda exterior del sector B de la celda 3. Por lo tanto, se selecciona el grupo C2 para minimizar la interferencia cross-layer. La distribución de recursos entre sectores (representada en la Figura 4.12(b)) permite coordinar los recursos reservados para los RNs, con los recursos empleados por los DeNBs adyacentes, con el objetivo de reducir la interferencia, permitiendo mejorar las prestaciones del sistema.

4.3.3 Resultados

En este subapartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para los esquemas de ICIC y RA preliminares, considerados como punto de referencia para proponer estrategias de RRM que busquen incrementar el reuso frecuencial para mejorar la eficiencia en el uso del espectro.

4.3.3.1 Condiciones de evaluación

En líneas generales, las condiciones de evaluación empleadas en este capítulo son las mismas que las empleadas en el capítulo anterior (apartado 3.4), pero adaptándolas al despliegue de RNs. En la Tabla 4.1 se recogen los parámetros empleados en la evaluación de los esquemas de ICIC y RA, que de la misma forma que en el capítulo anterior, han sido seleccionados de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32], considerando la estructura de trama FDD. El sistema celular considerado para este capítulo se compone de 21 macroceldas trisectorizadas, aplicando la técnica wrap-around para evitar los efectos en los bordes del sistema. Respecto al despliegue de los RNs se han considerado las dos configuraciones mostradas en la Figura 4.7, desplegándose dos y cuatro relays en cada sector respectivamente. De la misma forma que en el capítulo anterior, en cada celda se definen tres zonas con la misma área, con el objetivo de poder analizar de forma separada las prestaciones de los usuarios en diferentes regiones de la celda. Tal y como se ha mostrado en la Figura 3.9, la zona 0 es la zona más cercana al DeNB, mientras que la zona 2 es la zona más exterior y alejada.

Parámetro	Valor
Despliegue	21 celdas ($NBS = 21$) y 6/12 RNs por celda
Distancia entre estaciones base (ISD)	1732 m
Frecuencia central	2.5 GHz
Ancho de banda del sistema (BW)	5 MHz
Periodo de scheduling (TTI)	1 ms
Símbolos OFDM por TTI	14 (4 de ellos para control y pilotos)
Número de RBs	27
Tamaño del RB	12 subportadoras durante 1 TTI
Modelo de propagación	DeNB→UE(NLOS): $131.1 + 42.8\log_{10}(d[\text{km}])$
	RN→UE(NLOS): $145.4 + 37.5\log_{10}(d[\text{km}])$
	DeNB→RN(LOS): $100.7 + 23.5\log_{10}(d[\text{km}])$
	DeNB/RN→RN(NLOS): $125.2 + 36.3\log_{10}(d[\text{km}])$
Desviación estándar del shadowing (σ)	DeNB→UE: 8 dB
	RN→UE: 10 dB
	DeNB/RN→RN: 2 dB
Correlación en el shadowing entre celdas	0.5
Distancia de correlación del shadowing	50 m
Modelo multicamino	Pedestrian-A extendido (3km/h)
Modelo Doppler	Jakes
Densidad espectral de ruido	-174 dBm/Hz
Potencia máxima de transmisión (DeNB)	43 dBm
Ganancia de antena (DeNB)	14 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (DeNB)	70° (-3 dB) con 25 dB de relación delante-atrás
Potencia máxima de transmisión (RN)	37 dBm
Ganancia de antena (RN) (Tx/Rx)	5 dB / 7 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (RN) (Tx)	Omnidireccional
Patrón de radiación horizontal de la antena (RN) (Rx)	70° (-3 dB) con 20 dB de relación delante-atrás
Ganancia de antena (UE)	0 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (UE)	Omnidireccional
Ganancia de diversidad en transmisión	3 dB
Ganancia de diversidad en recepción	3 dB
Figura de ruido del receptor (RN)	5 dB
Figura de ruido del receptor (UE)	9 dB

Tabla 4.1: Parámetros generales de simulación

Se considera un ancho de banda de 5 MHz para todo el sistema, por lo que se dispone de 27 RBs. Por lo tanto, cada uno de los 9 GrRBs definidos en la Figura 4.9 contiene 3 RBs. Dentro de un mismo RB se asigna la misma potencia de transmisión y el mismo MCS a todas sus subportadoras. Se aplica el mismo modelado de nivel físico y de enlace descrito en el subapartado 3.4.1, modelando de forma explícita la interferencia. Se consideran los mismos MCSs, por lo que en la Tabla 3.1 pueden verse los valores de SINR requeridos, así como la tasa de datos útiles por RB para cada MCS. También se considera el mismo modelado del canal radio detallado en el subapartado 3.4.2, y en la Tabla 4.1 se recogen los valores relacionados con este modelado.

El mecanismo de CQI aplicado en este capítulo es el mismo que el considerado en el capítulo anterior (subapartado 3.4.3), pero teniendo en cuenta las particularidades de los despliegues de relays. En este caso, tanto cada UE, como cada RN, reportan al nodo que les da servicio información acerca del estado del canal empleando mensajes CQI. Además, en los despliegues de relays se definen dos tipos de subtramas, y las condiciones de interferencia observadas por los UEs en cada uno de los tipos de subtramas son diferentes. Por lo tanto, los usuarios calculan diferentes CQIs para cada tipo de subtrama. Desde el punto de vista de los RNs, solo es necesario calcular un CQI para el tipo de subtrama en el que el RN recibe su enlace backhaul. De esta forma, los UEs y RNs generan un nuevo CQI para el tipo de subtrama correspondiente cada ΔT_{CQI} ms, promediando la CINR observada para cada RB durante los últimos W_{CQI} ms. Cada vez que se obtiene un nuevo CQI transcurren Δ_{CQI} ms hasta que este CQI está disponible en el scheduler del nodo que da servicio al UE o al RN para el tipo de subtrama correspondiente. Por lo tanto, se modelan explícitamente tanto los errores en la estimación del canal, como los errores en la estimación de la interferencia. Los parámetros del esquema de CQI se recogen en la Tabla 4.2.

Parámetro	Valor
Tiempo entre CQIs (ΔT_{CQI})	2 ms
Ventana de promediado de CQI (W_{CQI})	4 ms
Retardo de CQIs (Δ_{CQI})	4 ms

Tabla 4.2: Esquema de CQI

Respecto al modelado de conexiones, se aplica el mismo modelo que en el capítulo anterior (subapartado 3.4.4), del tal forma que se asume que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos entre el DeNB o el RN y el UE en el enlace descendente. Como el objetivo es poder evaluar el throughput global del sistema proporcionado por los diferentes esquemas de ICIC que se proponen en este capítulo, en este caso se emplea el

modelo de tráfico full-buffer. En el modelo full-buffer se considera que todos los usuarios del sistema siempre tienen datos pendientes de ser transmitidos en los buffers de su conexión.

Para definir los valores de la máscara de potencia empleada en los diferentes algoritmos de ICIC para los dos tipos de nodo es necesario tener en cuenta el número de RBs asignables por cada nodo. Respecto a los DeNBs hay que tener también en cuenta que hay esquemas de ICIC en los que se considera una subbanda exterior de recursos, y, por lo tanto, dos niveles de potencia de transmisión. Mientras que por otro lado hay esquemas de ICIC en los que no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita. En los esquemas de ICIC en los que se considera una subbanda exterior de recursos, la potencia de transmisión por RB en la subbanda exterior ($M_{med,c}^{ext}$) se define como un incremento Δ_{ext} de 3 dB, respecto a la potencia de transmisión por RB en la subbanda interior ($M_{med,c}^{int}$), tal y como se expresa en la ecuación (4.1). Teniendo en cuenta la ecuación (4.1), los dos niveles de la máscara de potencia, $M_{med,c}^{int}$ y $M_{med,c}^{ext}$, se obtienen para cada celda c mediante la ecuación (4.2), donde $N_{total,int,c}$ es el número total de RBs de la subbanda interior de la celda c , $N_{total,ext,c}$ es el número total de RBs de la subbanda exterior de la celda c y $P_{T,max}^c$ es la potencia máxima de transmisión de la celda c .

$$M_{med,c}^{ext} \left[\frac{dBm}{RB} \right] = M_{med,c}^{int} \left[\frac{dBm}{RB} \right] + \Delta_{ext} [dB] \quad (4.1)$$

$$N_{total,int,c} \cdot 10^{\frac{M_{med,c}^{int} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} + N_{total,ext,c} \cdot 10^{\frac{M_{med,c}^{ext} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} = P_{T,max}^c [mW] \quad (4.2)$$

En los esquemas de ICIC en los que no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita en los DeNBs, y para el caso de los RNs, la potencia máxima de transmisión del nodo ($P_{T,max}^n$) se distribuye de forma equitativa entre todos los RBs asignables. Por lo tanto, el único nivel de la máscara de potencia ($M_{med,n}$) se obtiene tal y como se expresa en la ecuación (4.3), donde $N_{total,n}$ es el número total de RBs que son asignables por el nodo n , ya sea un DeNB o un RN. Como el objetivo es poder evaluar el throughput global del sistema proporcionado por los diferentes esquemas de ICIC, en este capítulo se considera una asignación fija de potencia tanto en los DeNBs, como en los RNs. Por lo tanto, cuando un RB es asignado a un UE o a un RN, el DeNB o RN que da servicio asignará la potencia definida por la máscara de potencia para ese RB en concreto (M_{med}).

$$N_{total,n} \cdot 10^{\frac{M_{med,n} \left[\frac{dBm}{RB} \right]}{10}} = P_{T,max}^n [mW] \quad (4.3)$$

En la Tabla 4.3 se recogen los valores de las máscaras de potencia expresadas en dBm/RB para los esquemas de ICIC preliminares que se van a evaluar en este subapartado. Aplicando el mismo planteamiento que en el capítulo anterior, y al margen de la especificación LTE, cuando el número de RBs preasignados a los RNs es menor que el número de RBs disponibles en el sistema, se ha presupuestado un nivel de potencia en las señales de referencia incrementado respecto a la EPRE, y asimismo un nivel de transmisión por RB más alto, asumiendo que la potencia total ($P_{T,max}^n$) se va a repartir equitativamente entre solo un subconjunto de los REs del ancho de banda total del sistema. Por otro lado, cuando el número de RBs planificados para los DeNBs excede el número de RBs disponibles en el sistema debido a la consideración de esquemas de reuso frecuencial, se ha presupuestado un nivel de potencia en las señales de referencia reducido respecto a la EPRE, y asimismo un nivel de transmisión por RB más bajo, asumiendo que la potencia total se va a repartir equitativamente entre un mayor conjunto de REs efectivos. En los esquemas de ICIC en los que se considera una subbanda exterior de recursos, se incrementa el nivel de potencia en las señales de referencia. Hay que tener en cuenta, que respecto al número total de RBs planificados para los DeNBs en ambas subbandas ($N_{total,int,c}$ y $N_{total,ext,c}$) la Tabla 4.3 incluye ambos tipos de subtramas (acceso y backhaul), de tal forma que el nivel de potencia en las señales de referencia y la máscara de potencia se calculan para el tipo de subtrama más restrictivo. Finalmente, merece la pena resaltar, que debido a que el número de RBs asignados a los RNs es bajo, la máscara de potencia de los RNs es mayor que la de los DeNBs. No obstante, se consideran antenas directivas en los DeNBs con una ganancia de antena muy superior a la de la antena omnidireccional considerada en los RNs (Tabla 4.1).

Esquema	$N_{total,int,c}$	$N_{total,ext,c}$	$N_{total,r}$	$M_{med,c}^{int}$	$M_{med,c}^{ext}$	$M_{med,r}$
PF7-Back_op1	9 / 27	0 / 0	3	28.69	0	32.23
PF7-Back_op2	9 / 36	0 / 0	3	27.44	0	32.23
PF4-Back_op1	18 / 27	0 / 0	3	28.69	0	32.23
PF4-Back_op2	18 / 36	0 / 0	3	27.44	0	32.23
PF3-Back_op1	21 / 27	0 / 0	3	28.69	0	32.23
PF3-Back_op2	21 / 36	0 / 0	3	27.44	0	32.23
SFR_bm_op1-Back_op2	18 / 36	0 / 0	3	27.44	0	32.23
SFR_bm_op2-Back_op2	18 / 36	9 / 0	3	27.44	30.44	32.23

Tabla 4.3: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC preliminares [dBm/RB]

Las entidades asociadas con la gestión de recursos radio, incluyendo la asignación de potencia, la asignación de recursos en tiempo y frecuencia y la selección adaptativa del MCS, están localizadas en los DeNBs y los RNs. Las decisiones de scheduling se toman de forma independiente en cada nodo cada TTI, asumiéndose un periodo de scheduling de 1 ms. Como se ha comentado en los capítulos anteriores, en esta tesis la asignación de recursos se trata como un problema multidimensional. Los esquemas de ICIC presentados determinan qué recursos frecuenciales pueden ser asignados en cada nodo, sector y tipo de enlace. Posteriormente es el scheduler el que asigna los recursos frecuenciales a cada UE o RN, aplicándose sus dos componentes de forma secuencial. Como en este capítulo se emplea un modelo de tráfico full-buffer se ha decidido aplicar el algoritmo PF (Proportional Fair) [48] como política de scheduling temporal. En la ecuación (4.4) se expresa la política de scheduling temporal, donde $\bar{T}_{alc}^u(t)$ es el promedio de la tasa de datos que el usuario u puede alcanzar en esta subtrama t , y $\bar{T}_{serv}^u(t-1)$ es el promedio de la tasa de datos servida al usuario u en las últimas subtramas. $\bar{T}_{alc}^u(t)$ se estima teniendo en cuenta la tasa de transmisión del esquema MCS que se seleccionaría en función de las condiciones de canal del UE, y considerando los RBs que le pueden ser asignados este TTI. \bar{T}_{serv}^u se calcula de forma recursiva empleando la ecuación (4.5), considerando un intervalo de filtrado de la estimación de longitud t_f TTIs. $T_{serv}^u(t)$ es la tasa de datos servida finalmente al UE u en la subtrama t . El algoritmo PF proporciona un buen compromiso entre el throughput global del sistema y un reparto equitativo entre todos los usuarios cuando se emplean servicios best effort, como el modelo de tráfico full-buffer. Posteriormente, el scheduler frecuencial asignará recursos prioritariamente a aquellos usuarios con mayor índice de prioridad.

$$u^* = \arg \max_u \left(\frac{\bar{T}_{alc}^u(t)}{\bar{T}_{serv}^u(t-1)} \right) \quad (4.4)$$

$$\bar{T}_{serv}^u(t) = \left(1 - \frac{1}{t_f} \right) \cdot \bar{T}_{serv}^u(t-1) + \left(\frac{1}{t_f} \right) \cdot T_{serv}^u(t) \quad (4.5)$$

Respecto al scheduling frecuencial de los DeNBs, en primer lugar, se intentará asignar a los UEs en RBs pertenecientes a la subbanda interior preasignada al sector que les da servicio. Como en este capítulo se emplea un modelo de tráfico full-buffer, de forma general los DeNBs asignarán completamente sus RBs disponibles, por lo que al contrario que en el capítulo anterior, no se considera la asignación ordenada de los RBs de la subbanda interior planificada a cada sector del esquema FFRopa, y el scheduler

frecuencial asignará a cada UE el RB en el que observa mejores condiciones de canal. Si toda la subbanda interior preasignada al sector que da servicio al UE ya ha sido asignada, el scheduler intenta asignar al UE en los RBs de la subbanda interior preasignada al sector con menor ocupación, escogiendo también el RB que ofrece al UE las mejores condiciones de canal. Si la asignación del UE no es posible en la subbanda interior, se inicia el proceso de renegociación, que permite reubicar a otros UEs ya asignados en otros RBs, con el objetivo de liberar RBs que puedan ser asignados al UE que se está considerando. Si finalmente la asignación del UE no es posible en la subbanda interior, y el esquema de ICIC considera una subbanda exterior de recursos, el scheduler frecuencial intenta asignar al UE en los RBs pertenecientes a la subbanda exterior preasignada al sector que le da servicio, seleccionando el RB en el que el UE observa mejores condiciones de canal. Si toda la subbanda exterior preasignada al sector que da servicio al UE ya ha sido asignada, y el esquema de ICIC no considera una sectorización estricta en la subbanda exterior, el scheduler intenta asignar al UE en los RBs de la subbanda exterior preasignada al sector con menor ocupación, escogiendo también el RB que ofrece al UE las mejores condiciones de canal. Si la asignación del UE no es posible en la subbanda exterior, también se inicia un proceso de renegociación.

En el caso de los RNs, el procedimiento seguido por el scheduler frecuencial es similar al de los DeNBs, pero teniendo en cuenta que no se definen subbandas dentro de sus recursos disponibles. Como se ha comentado antes, en este capítulo se considera una asignación fija de potencia, tanto en los DeNBs, como en los RNs, por lo que el scheduler frecuencial asignará la potencia definida por la máscara de potencia para cada RB en concreto (M_{med}). Como se emplea el modelo de tráfico full-buffer, con el objetivo de evitar la monopolización de recursos por parte de los usuarios que observan buenas condiciones de canal, solo se permite asignar un RB a cada usuario en cada subtrama. El scheduler frecuencial seleccionará el MCS más alto posible, siempre que se satisfagan los requisitos de SINR ($SINR_{req}^m$).

En cada DeNB se distribuyen 180 UEs de forma homogénea, de tal forma que la cantidad de usuarios en cada zona de la celda es la misma (60 UEs en cada una de las tres zonas). Los usuarios se desplazan a una velocidad de 3km/h siguiendo el mismo patrón de movimiento que el aplicado en el capítulo anterior (subapartado 3.4.8). Asimismo, el movimiento de los UEs está restringido para que siempre se mantengan dentro de los límites de su respectivo sector para evitar handovers entre sectores y entre DeNBs vecinos. El criterio de selección de nodo está basado en la RSRP, por lo que un UE se conectará a un RN si la RSRP del RN es mayor que la RSRP del DeNB, tal y como se expresa en la ecuación (4.6). Hay que tener en cuenta que como el movimiento de los UEs

está restringido para mantenerse siempre dentro de los límites de su respectivo sector del DeNB, un UE podrá estar conectado a su sector del DeNB o a alguno de los RNs desplegados en su sector.

$$(RSRP_{RN})_{dB} > (RSRP_{DeNB})_{dB} \quad (4.6)$$

Teniendo en cuenta que la distribución de usuarios sobre la celda es homogénea, y que el modelo de tráfico empleado es full-buffer, la demanda de tráfico será uniforme. Por ello, en los esquemas de RA que se presentan en este capítulo se planifica la misma cantidad de recursos frecuenciales a todos los sectores de los DeNBs y a todos los RNs del sistema. De acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32] se considera que se ha llevado a cabo una planificación de las ubicaciones de los RNs, encontrando una ubicación óptima para cada RN que ofrece una optimización de las condiciones de canal observadas por el RN en el enlace con su DeNB. Esta optimización se traduce en las simulaciones añadiendo un bonus de 5 dB a las pérdidas de propagación del link entre el RN y su DeNB (DeNB→RN).

4.3.3.2 Esquemas PFX

En la Tabla 4.4 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas PFX, empleando los esquemas Back_op1 y Back_op2 para las subtramas backhaul (Figura 4.10). Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. Se muestra el throughput promedio global por celda, desglosando también el throughput obtenido por los diferentes enlaces (directo, acceso y backhaul) en los dos tipos de subtrama: subtrama de acceso y subtrama backhaul. Hay que tener en cuenta que el throughput global ($Thr_{avg,global}$) solo incluye el throughput recibido por los usuarios finales, y se obtiene como se muestra en la ecuación (4.7). $Thr_{avg,mUEs}^{acceso}$ y $Thr_{avg,mUEs}^{backhaul}$ es el throughput promedio por celda obtenido por los mUEs en las subtramas de acceso y backhaul respectivamente, $Thr_{avg,rUEs}^{acceso}$ es el throughput promedio por celda obtenido por los rUEs en las subtramas de acceso y $Thr_{avg,RNs}^{backhaul}$ es el throughput promedio por celda recibido por los RNs en las subtramas backhaul (capacidad promedio de los enlaces backhaul). En la Tabla 4.4 también se incluye para cada esquema el número de RBs planificados para los enlaces de acceso (indicado con la letra A) y el enlace backhaul (indicado con la letra B) de cada RN. En este caso, para todos los esquemas de ICIC que se muestran en la Tabla 4.4 se ha planificado 1 GrRB (3 RBs) para los enlaces de acceso de cada RN, y 1 GrRB para el enlace backhaul de cada RN, tal y como se representa en la Figura 4.10.

$$Thr_{avg,global} = Thr_{avg,mUEs}^{acceso} + Thr_{avg,mUEs}^{backhaul} + \min(Thr_{avg,rUEs}^{acceso}, Thr_{avg,RNs}^{backhaul}) \quad (4.7)$$

A modo de referencia, y para evaluar la ganancia de prestaciones obtenida por el despliegue de relays, en la Tabla 4.4 se incluyen los resultados obtenidos por una red macrocelular sin despliegue de relays. El esquema de ICIC considerado en este caso es un esquema FFR con sectorización estricta en la subbanda exterior, y sin considerar una ordenación en la asignación de recursos. Además, también se representa el porcentaje de ganancia que proporcionan los diferentes esquemas de ICIC para despliegues de relays respecto al throughput alcanzado por el despliegue macrocelular convencional.

Esquema	RBs A/B	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
		mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
Macroceldas	-	-	-	-	-	10.65
PF7 - Back_op1	3 / 3	1.93	4.09	1.93	4.32	7.95 (-25.4%)
PF7 - Back_op2	3 / 3	1.88	4.06	3.97	4.26	9.91 (-6.9%)
PF4 - Back_op1	3 / 3	3.94	3.63	1.88	4.32	9.45 (-11.3%)
PF4 - Back_op2	3 / 3	3.90	3.60	3.90	4.26	11.40 (7.0%)
PF3 - Back_op1	3 / 3	4.61	3.10	1.85	4.32	9.56 (-10.2%)
PF3 - Back_op2	3 / 3	4.58	3.04	3.88	4.26	11.50 (8.0%)

Tabla 4.4: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas PFx (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)

Si se comparan los dos esquemas empleados en las subtramas backhaul, el esquema Back_op2 proporciona un gran incremento en el throughput recibido por los mUEs, gracias a la mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. A pesar de que en el esquema Back_op2 se incorpora el reuso frecuencial dentro del mismo DeNB, como los dos RNs que reúsan el mismo GrRB para sus enlaces backhaul son los localizados en los extremos opuestos de la celda, se minimiza la interferencia y se consigue que la degradación en las prestaciones de los enlaces backhaul sea mínima. Por lo tanto, el incremento del reuso frecuencial considerado en el esquema Back_op2 permite mejorar las prestaciones del sistema, gracias a planificar los recursos que son reutilizados para los enlaces backhaul de RNs opuestos.

Respecto a los esquemas para las subtramas de acceso, el esquema PF7 es el que proporciona el mayor throughput en los enlaces de acceso, gracias a que la interferencia co-layer que reciben los rUEs es bastante más débil que en los esquemas PF4 y PF3. Sin embargo, esta ganancia en los enlaces de acceso se consigue a costa de haber reducido los recursos disponibles para los enlaces directos, reduciendo notablemente el throughput logrado por los mUEs. De hecho, en términos del throughput global a nivel de celda el esquema PF7 es el que proporciona las peores prestaciones, no consiguiendo mejorar el throughput global obtenido por la red macrocelular convencional, debido al elevado

overhead de los enlaces backhaul. No obstante, el esquema PF7 puede ser una estrategia adecuada para lograr que los usuarios de los bordes de las celdas observen mejores condiciones de SINR. En la Figura 4.13(a) se representa la CDF de la SINR observada por los UEs cuando se aplica el esquema PF7 en las subtramas de acceso y el esquema Back_op2 en las subtramas backhaul, frente al escenario de la red macrocelular convencional. Cuando se aplica el esquema PF7 se mejora notablemente la SINR observada por los usuarios de las zonas 1 y 2, gracias a que bastantes usuarios de ambas zonas se conectan a los RNs, y se ven beneficiados de las buenas condiciones de canal que ofrece el esquema PF7 para los enlaces de acceso. Por el contrario, la SINR recibida por los usuarios de la zona 0 se ve ligeramente degradada cuando se emplea el esquema PF7. Esto se debe principalmente a que un número reducido de usuarios de la zona 0 se conectan a los RNs porque reciben un mayor nivel de RSRP, pero observan niveles de SINR ligeramente inferiores a los observados por los usuarios de la zona 0 que permanecen conectados al DeNB.

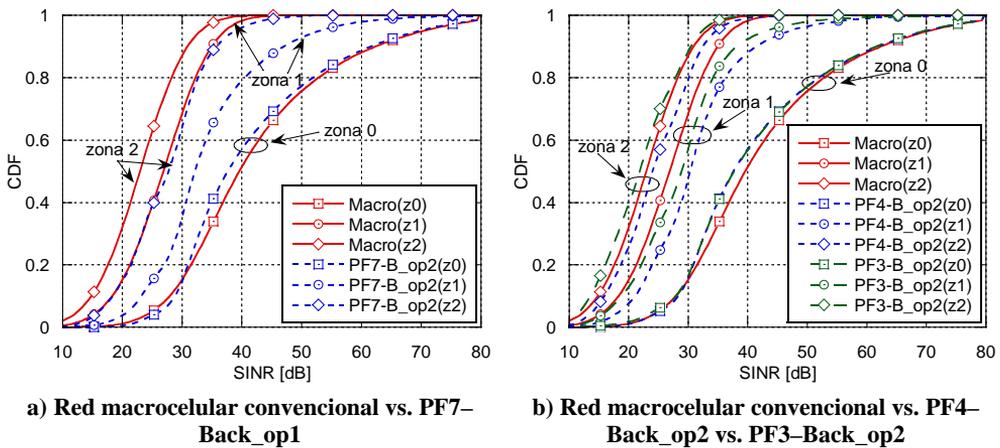


Figura 4.13: CDF de la SINR observada por los UEs en cada zona (esquemas PFx)

Los resultados muestran que el esquema PF7 no es capaz de compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul, por lo que es necesario considerar un mayor reuso frecuencial para materializar las ganancias potenciales ofrecidas por los despliegues de relays. En el esquema PF4 el ancho de banda se divide en cuatro partes, y cada una de las tres partes asignadas a los enlaces de acceso es reutilizada por dos RNs. De esta forma se incrementa el reuso frecuencial, permitiendo aumentar la cantidad de recursos disponibles para los enlaces directos. Gracias a ello, y tal y como se observa en la Tabla 4.4, el esquema PF4 permite incrementar notablemente el throughput alcanzado por los mUEs, a costa de empeorar el throughput logrado por los rUEs, debido al incremento de la interferencia co-layer sobre los enlaces de acceso. La ganancia

obtenida en el throughput de los mUEs es superior a la degradación del throughput de los rUEs, por lo tanto, el esquema PF4 permite incrementar el throughput global del sistema. En el esquema PF3 el reuso frecuencial es más agresivo, incrementando todavía más la disponibilidad de recursos para los enlaces directos, y obteniendo una mejora en el throughput de los mUEs. Como contrapartida, el incremento del reuso frecuencial aumenta la interferencia co-layer observada por los enlaces de acceso, empeorando el throughput logrado por los rUEs. En este caso, la ganancia obtenida en el throughput de los mUEs es menor ya que solo se está añadiendo 1 GrRB adicional a los enlaces directos, y esta ganancia es similar a la pérdida de prestaciones sufrida por los rUEs debida al incremento de la interferencia co-layer. Por ello, los esquemas PF4 y PF3 proporcionan un throughput global a nivel de celda similar.

En la Figura 4.13(b) se representa la CDF de la SINR observada por los UEs cuando se aplican los esquemas PF4-Back_op2 y PF3-Back_op2, frente al escenario de la red macrocelular convencional. El esquema PF4 permite mejorar la SINR observada por los UEs de las zonas 1 y 2 cuando se compara con el escenario macrocelular convencional, gracias a que muchos usuarios de estas dos zonas se benefician de las mejores condiciones de canal que ofrecen los enlaces de acceso. Respecto al esquema PF3, mejora la SINR observada por los usuarios de la zona 1 comparado con el escenario macrocelular convencional, ya que los rUEs de esta zona se encuentran bastante cerca de los RNs, mientras que se empeoran las prestaciones de los usuarios de la zona 2, ya que los rUEs de esta zona reciben fuertes niveles de interferencia de los RNs vecinos pertenecientes a los DeNBs adyacentes. Por ello es necesario controlar cuidadosamente la interferencia del sistema, ya que de lo contrario un mayor reuso frecuencial no proporciona un incremento en las prestaciones. En ambos esquemas, PF4 y PF3, la SINR observada por los UEs de la zona 0 es ligeramente inferior que en el escenario macrocelular convencional, debido principalmente a que, igual que en el esquema PF7, un número reducido de usuarios de la zona 0 se conectan a los RNs, pero observan niveles de SINR ligeramente inferiores a los observados por los usuarios de la zona 0 que permanecen conectados al DeNB. Aunque la ganancia proporcionada por los esquemas PFx en términos de throughput global no es muy significativa (7% con el esquema PF4-Back_op2 y 8% con el esquema PF3-Back_op2), los esquemas PF7 y PF4 son capaces de mejorar las prestaciones de los usuarios ubicados en los bordes de las celdas. Los resultados de los esquemas PFx muestran que es necesario considerar un mayor reuso frecuencial, pero planificando cuidadosamente el reparto de recursos entre los diferentes nodos y enlaces, para así poder proporcionar niveles adecuados de interferencia, y poder sacar provecho de las ventajas potenciales de los despliegues de relays.

4.3.3.3 Esquemas basados en SFR inspirados en propuestas de la literatura: SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos para los esquemas basados en SFR e inspirados en propuestas de la literatura: SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2. Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. Respecto a las subtramas backhaul se ha empleado el esquema Back_op2 en ambos casos, ya que sus prestaciones son superiores a las ofrecidas por el esquema Back_op1. Si se comparan los resultados obtenidos con el esquema SFR_bm_op1-Back_op2 con los obtenidos para el esquema PF4-Back_op2, puede observarse que el throughput alcanzado por los rUEs es ligeramente inferior cuando se emplea el esquema SFR_bm_op1. En el esquema PF4 los enlaces de acceso solo reciben interferencia de los RNs vecinos, ya que los DeNBs utilizan recursos frecuenciales distintos para asignar a sus enlaces directos, y por lo tanto no existe interferencia cross-layer. En el esquema SFR_bm_op1 la interferencia co-layer que sufren los enlaces de acceso es más leve, ya que se planifican diferentes RBs para los RNs vecinos de los DeNBs adyacentes. Sin embargo, los enlaces de acceso reciben interferencia cross-layer de los DeNBs adyacentes. Por ejemplo, el grupo C3 asignado a los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1 recibirá potencialmente interferencia del sector C de la celda 2 y del sector B de la celda 3 (Figura 4.11(a)). Por lo tanto, debido a que la potencia de transmisión de los DeNBs es más elevada que la de los RNs, los niveles de interferencia que reciben los rUEs para el esquema SFR_bm_op1 son más severos que para el esquema PF4, degradando sus prestaciones.

Esquema	RBs A/B	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
		mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
SFR_bm_op1 - Back_op2	3 / 3	4.16	3.49	3.81	4.26	11.46 (7.6%)
SFR_bm_op2 - Back_op2	3 / 3	6.16	3.66	3.49	4.26	13.31 (25.0%)

Tabla 4.5: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2 (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)

Respecto a los enlaces directos, los resultados del esquema SFR_bm_op1 son ligeramente mejores que los obtenidos para el esquema PF4, pero su interpretación requiere un análisis más detallado. En primer lugar, los niveles de interferencia que reciben los mUEs en las subtramas de acceso para el esquema SFR_bm_op1 son superiores a los niveles de interferencia proporcionados por el esquema PF4 en las subtramas de acceso, y también son superiores a los niveles de interferencia proporcionados por el esquema Back_op2 en las subtramas backhaul. Esto es debido a que en el esquema SFR_bm_op1 se definen tres patrones de celda diferentes, de tal manera que los recursos planificados para los

enlaces directos de un sector son potencialmente asignados por alguno de los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Por lo tanto, cuando se aplica el esquema SFR_bm_op1-Back_op2, en general, las condiciones de interferencia de los mUEs son peores en las subtramas de acceso que en las subtramas backhaul, mientras que cuando se aplica el esquema PF4-Back_op2, las condiciones de interferencia de los enlaces directos son similares en ambos tipos de subtramas. Debido a ello, en las subtramas de acceso del esquema SFR_bm_op1-Back_op2 el scheduler temporal, que está basado en el algoritmo PF (ecuación (4.4)), asigna mayor prioridad a los mUEs que observan mejores condiciones de canal (principalmente los mUEs que se encuentran cerca del DeNB), ya que aunque las condiciones de interferencia sean peores, estos mUEs pueden recibir MCSs más elevados. Es por ello que el throughput agregado de los mUEs para las subtramas de acceso es más alto cuando se emplea el esquema SFR_bm_op1. Por el contrario, como las condiciones de interferencia son mejores en las subtramas backhaul, los mUEs con peores condiciones de canal reciben mayor prioridad en las subtramas backhaul, y por lo tanto reciben más asignaciones. Se trata principalmente de los mUEs situados en los bordes de los DeNBs, por lo que solo podrán emplear los MCSs más bajos, provocando que el throughput agregado de los mUEs en las subtramas backhaul sea más bajo cuando se emplea el esquema SFR_bm_op1-Back_op2. A nivel global, el throughput agregado de los mUEs considerando ambos tipos de subtramas es un poco superior cuando se aplica el esquema SFR_bm_op1-Back_op2 (7.97 Mbps), que cuando se aplica el esquema PF4-Back_op2 (7.80 Mbps). En la Figura 4.14(a) se representa la CDF del throughput recibido por los mUEs cuando se aplica el esquema SFR_bm_op1-Back_op2 (a partir de ahora identificado únicamente como SFR_bm_op1), frente al esquema PF4-Back_op2 (a partir de ahora identificado únicamente como PF4). Puede verse como el esquema SFR_bm_op1 permite mejorar las prestaciones de los mUEs de la zona 0 gracias a que reciben más asignaciones de RBs, pero a costa de empeorar ligeramente las prestaciones de los mUEs de la zona 2 al recibir menos asignaciones de RBs.

A diferencia del esquema SFR_bm_op1, donde la subbanda exterior de recursos de cada DeNB es usada por los RNs para sus enlaces de acceso, en el esquema SFR_bm_op2 todo el ancho de banda del sistema es usado por los DeNBs para asignar sus enlaces directos. La mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos en las subtramas de acceso proporcionada por el esquema SFR_bm_op2, permite incrementar significativamente el throughput agregado de los mUEs en este tipo de subtrama (Tabla 4.5). Hay que tener en cuenta que en el caso del esquema SFR_bm_op2 los DeNBs transmiten con mayor potencia en la subbanda exterior, y una mayor cantidad de usuarios permanecen conectados a los DeNBs, especialmente usuarios de las zonas

exteriores de los DeNBs (zonas 1 y 2). Además, como en el esquema SFR_bm_op2 también se definen tres patrones de celda, las condiciones de interferencia observadas por los mUEs también son peores en las subtramas de acceso, que en las subtramas backhaul, donde se aplica el esquema Back_op2. Por lo tanto, el scheduler temporal asigna mayor prioridad a los mUEs que observan peores condiciones de canal (principalmente los mUEs de la zona 2) en las subtramas backhaul, y como además un mayor número de UEs de esta zona 2 permanecen conectados a los DeNBs, todo ello conlleva a que un mayor ratio de los RBs disponibles en las subtramas backhaul sean asignados a UEs de las zonas exteriores de las celdas. Como generalmente estos UEs de las zonas exteriores solo pueden emplear los MCSs más bajos, el throughput agregado de los mUEs para las subtramas backhaul se ve reducido cuando se emplea el esquema SFR_bm_op2-Back_op2 (a partir de ahora identificado simplemente como SFR_bm_op2). No obstante, a nivel global, el throughput agregado de los mUEs considerando ambos tipos de subtramas se ve significativamente incrementado en el esquema SFR_bm_op2 (9.65 Mbps).

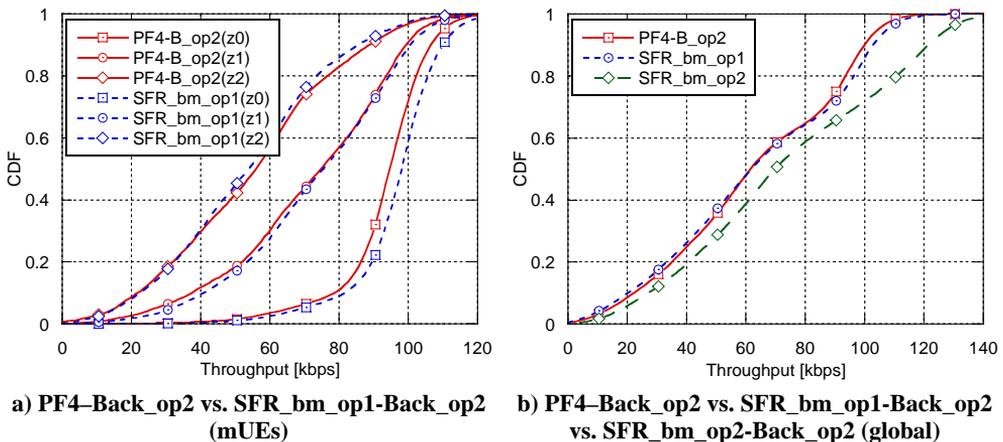


Figura 4.14: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas SFR_bm_opx)

En el esquema SFR_bm_op2 los DeNBs utilizan todo el ancho de banda del sistema para asignar sus enlaces directos, por lo tanto, los recursos frecuenciales asignados a los enlaces de acceso de los RNs reciben interferencia de su propio DeNB, a diferencia de los esquemas analizados hasta ahora. No obstante, como los DeNBs siguen la ordenación en la asignación de recursos descrita en la Figura 4.12(b), se han planificado para los enlaces de acceso de los RNs aquellos recursos que no son potencialmente empleados ni por su propio sector, ni por los principales sectores interferentes de los DeNBs adyacentes, minimizando la interferencia cross-layer. Respecto a la interferencia co-layer, los RNs vecinos utilizan diferentes GrRBs, consiguiendo proporcionar niveles bajos de

interferencia co-layer, similares a los obtenidos con el esquema SFR_bm_op1. En la Tabla 4.5 puede verse que el throughput agregado de los rUEs es ligeramente superior cuando se aplica el esquema SFR_bm_op2, que cuando se aplica el esquema SFR_bm_op1, obteniendo prestaciones similares a las obtenidas por el esquema PF4 (Tabla 4.4). En el esquema SFR_bm_op1 los rUEs no reciben interferencia de su propio DeNB, sin embargo, los RBs asignados a los enlaces de acceso son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Con lo que es especialmente en las zonas exteriores del DeNB donde la interferencia es más fuerte al provenir de los sectores de los DeNBs vecinos, afectando más a los rUEs de las zonas exteriores que se encuentran más alejados del RN que les da servicio. Por el contrario, en el esquema SFR_bm_op2 los rUEs son principalmente interferidos por el sector adyacente de su propio DeNB, haciéndose más débil la interferencia cross-layer en las zonas exteriores del DeNB, protegiendo a los rUEs que se encuentran más alejados del RN que les da servicio. Por lo tanto, a pesar de que en el esquema SFR_bm_op2 se incrementa el reuso frecuencial, permitiendo que los RNs reutilicen parte de los recursos asignados por el DeNB que les da servicio, gracias a la planificación de recursos prioritarios para los sectores de los DeNBs se pueden planificar los recursos asignados a los enlaces de acceso de los RNs, evitando niveles excesivos de interferencia cross-layer. Esto permite incrementar la disponibilidad de recursos para los enlaces directos, sin impactar significativamente las prestaciones de los enlaces de acceso, del tal forma, que el esquema SFR_bm_op2 obtiene el mejor throughput global de la red (Tabla 4.5). En la Figura 4.14(b) se representa la CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_bm_opx y PF4. Las CDFs del throughput para los esquemas SFR_bm_op1 y PF4 son similares, pero puede observarse como en el esquema SFR_bm_op1 se empeoran ligeramente las prestaciones de los UEs que reciben throughput bajo, debido a que los mUEs de la zona 2 reciben menos asignaciones de RBs, mientras que se mejoran las prestaciones de los UEs que reciben throughput alto, gracias a que los mUEs de la zona 0 reciben más asignaciones de RBs, tal y como se ha visto en la Figura 4.14(a). Finalmente, el esquema SFR_bm_op2 es el que obtiene las mejores prestaciones, gracias principalmente al aumento de la disponibilidad de recursos para los enlaces directos.

4.3.3.4 Conclusiones

Con los resultados se ha visto que es necesario considerar reuso frecuencial dentro del DeNB entre los diferentes enlaces para poder compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul, y poder obtener la ganancia potencial de los despliegues relays. No obstante, también se ha visto que es necesario diseñar cuidadosamente los esquemas de ICIC para garantizar niveles adecuados de

interferencia para los diferentes tipos de enlaces presentes en los despliegues relays. Ya que, si la interferencia no se gestiona adecuadamente, un mayor reuso frecuencial puede no conllevar un incremento en las prestaciones de la red, tal y como se ha visto con el esquema PF3.

El esquema SFR_bm_op2 muestra que no es necesario reservar una porción de los recursos frecuenciales para los enlaces de acceso de los RNs, permitiendo que los DeNBs tengan disponible todo el ancho de banda del sistema para asignar sus enlaces directos, incrementando el throughput global del sistema. Esto es posible gracias a la planificación de recursos prioritarios para los diferentes sectores de los DeNBs, ya que permite planificar a su vez los recursos asignados a los enlaces de acceso de los RNs, evitando los recursos frecuenciales que son asignados prioritariamente por los sectores interferentes dominantes, tanto del propio DeNB, como de los DeNBs adyacentes. De esta forma se consigue incrementar la disponibilidad de recursos para los enlaces directos, a la vez que se garantizan condiciones de interferencia adecuadas para los enlaces de acceso. En la Figura 4.15 se representa el throughput promedio por celda para los esquemas preliminares más relevantes, mostrando también por separado el throughput agregado de los mUEs y rUEs, e incluyendo el porcentaje de ganancia respecto al throughput alcanzado por el despliegue macrocelular convencional.

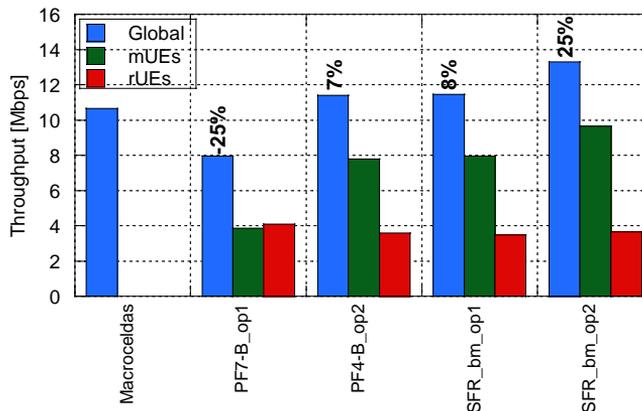


Figura 4.15: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas preliminares más relevantes

4.4 Esquemas propuestos de ICIC y RA

Los esquemas de asignación de recursos descritos hasta ahora están basados en soluciones existentes propuestas en la literatura, y se han tomado como punto de partida para los esquemas que se proponen en los siguientes subapartados. En las soluciones que se han analizado previamente, los relays solo pueden asignar

recursos frecuenciales a sus rUEs en un único GrRB. Sin embargo, si se quieren incrementar los recursos disponibles para los enlaces de acceso, para mejorar el reuso frecuencial, la interferencia que se genera podría ser demasiado elevada. Por ejemplo, si nos centramos en el esquema SFR_bm_op2 (Figura 4.11(b)), en el RN0 de la celda 1, se le podría añadir el grupo de recursos A2, el cual es empleado prioritariamente por su propio sector, o el grupo B2, el cual recibiría una fuerte interferencia de la celda 3. Es decir, son grupos de recursos en los que los rUEs recibirían un nivel elevado de interferencia. Por lo tanto, los esquemas de RA que se proponen a continuación persiguen el objetivo de poder incrementar el reuso frecuencial del sistema, pero proporcionando recursos con niveles aceptables de interferencia, para poder alcanzar las ventajas potenciales de los despliegues relays.

4.4.1 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: FFR_2GrRBs

El esquema FFR_2GrRBs se basa en un esquema FFR, considerando un reuso unidad a nivel de celda y celdas trisectorizadas. En el esquema FFR_2GrRBs se define un único patrón de celda, como puede observarse en la Figura 4.16. Se considera la misma ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que la representada en la Figura 4.12 para los esquemas SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2, pero aplicada en este caso sobre un esquema basado en FFR. De tal forma que los usuarios reciben asignaciones en primer lugar en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, y cuando un sector ocupa todos sus RBs prioritarios, comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda, seleccionando el sector que tenga menor ocupación. En este esquema FFR_2GrRBs, la sectorización estricta en la subbanda exterior es necesaria para proteger a los mUEs de los bordes de las celdas. Si no se aplicase sectorización estricta, sectores de celdas adyacentes podrían asignar los mismos recursos frecuenciales de la subbanda exterior, originando una fuerte interferencia que reduciría las prestaciones de los mUEs de los bordes de las celdas. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

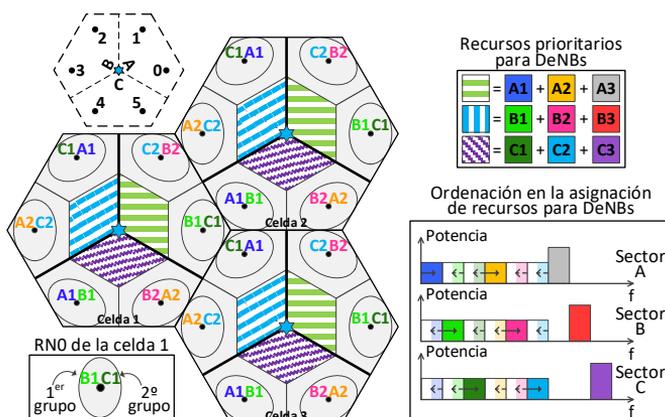


Figura 4.16: RA del esquema FFR_2GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

La idea principal del esquema FFR_2GrRBs es que cada RN pueda reutilizar en sus enlaces de acceso, dos GrRBs pertenecientes a la subbanda interior de su DeNB. Se escogen aquellos grupos de recursos que no son empleados prioritariamente por su propio sector, y se asignan diferentes grupos a los relays que son adyacentes siempre que sea posible. Aplicando este planteamiento, hay cuatro grupos a repartir para los relays de cada sector. Si por ejemplo se toma como referencia el sector A de la celda 1, los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso serían los grupos B1, B2, C1 y C2, puesto que son los grupos de recursos pertenecientes a la subbanda interior, que no son prioritariamente asignados por el propio sector A. Se ha considerado que cada relay puede asignar a sus rUEs en dos GrRBs, uno de ellos planificado para el sector adyacente (sector que se encuentra más próximo al RN), y el otro planificado para el sector opuesto (sector que se encuentra más alejado al RN). Es decir, si por ejemplo nos centramos en el RN0 de la celda 1, el grupo C1 está planificado para las transmisiones de los enlaces directos del sector C (sector adyacente), mientras que el grupo B1 está planificado para el sector B (sector opuesto). Hay que tener en cuenta, que la interferencia recibida por los rUEs en los RBs que son reutilizados en el sector adyacente, será más fuerte que la interferencia recibida en los RBs que son reutilizados en el sector opuesto de su propio DeNB, debido al patrón de radiación de las antenas. Existiría otra alternativa que sería escoger para cada RN los dos GrRBs planificados para su sector opuesto, pero conllevaría que RNs adyacentes del mismo DeNB utilizaran los mismos dos GrRBs. Por ejemplo, para el RN0 de la celda 1 se escogerían los grupos B1 y B2, que serían los mismos que los escogidos para el RN5 de la celda 1. En este caso, la interferencia co-layer que recibirían los rUEs localizados entre ambos RNs podría ser demasiado elevada, empeorando las prestaciones del sistema. Por ello se ha optado por asignar a los enlaces de acceso de cada RN un GrRB

planificado para el sector adyacente, y otro GrRB planificado para el sector opuesto, asignando diferentes GrRBs a los relays adyacentes siempre que sea posible, con el objetivo de minimizar la interferencia co-layer generada. Además, otro objetivo de esta elección de recursos frecuenciales es lograr que las prestaciones de todos los relays de la celda sean similares, proporcionado RBs con condiciones de interferencia similares a todos los relays.

Hay que tener en cuenta que, en condiciones de carga heterogéneas, la interferencia que reciben los rUEs de los enlaces directos de su propio sector del DeNB (empleando los RBs potencialmente planificados para los sectores adyacentes) es más fuerte, que la interferencia recibida de los relays vecinos, debido a que la potencia de transmisión de los DeNBs es mayor. Respecto a la interferencia recibida por los rUEs proveniente de DeNBs adyacentes, como los enlaces de acceso de los RNs utilizan los RBs planificados para los otros sectores de su DeNB, estos recursos reciben interferencia de los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Es decir, si se toma como referencia el RN0 de la celda 1, la ICI dominante de los DeNBs adyacentes proviene principalmente del sector C de la celda 2, que emplea prioritariamente el grupo C1, y del sector B de la celda 3, que emplea prioritariamente el grupo B1.

En condiciones de baja carga, si cada RN solo necesita un único GrRB, la mejor elección es asignar los RBs que serán empleados prioritariamente por el sector opuesto, ya que la interferencia será más débil (en la Figura 4.16 se representa qué GrRB se escoge en primer lugar). Además, en esta situación, los relays vecinos pertenecientes a las celdas adyacentes utilizarían diferentes grupos de recursos, reduciendo la interferencia co-layer, como en los esquemas SFR_bm_op1 y SFR_bm_op2. Sin embargo, puede ser interesante considerar un mayor reuso frecuencial entre RNs vecinos, ya que el incremento en la interferencia co-layer podría compensarse con la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los RNs. Por ello en el esquema FFR_2GrRBs se han asignado dos GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN, asignando en la medida de lo posible diferentes GrRBs a los RNs vecinos. Los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

En el esquema FFR_2GrRBs se ha incrementado la cantidad de RBs que los relays tienen disponibles para sus enlaces de acceso. Por lo tanto, es necesario incrementar la capacidad de los enlaces backhaul, para poder garantizar que el throughput alcanzado sea al menos igual que el throughput agregado de sus enlaces de acceso. En la Figura 4.17 se muestra el esquema Back_op3, que hace referencia a las subtramas backhaul, en el que se ha considerado un único patrón de celda, como solución adecuada para el esquema FFR_2GrRBs (Figura 4.16).

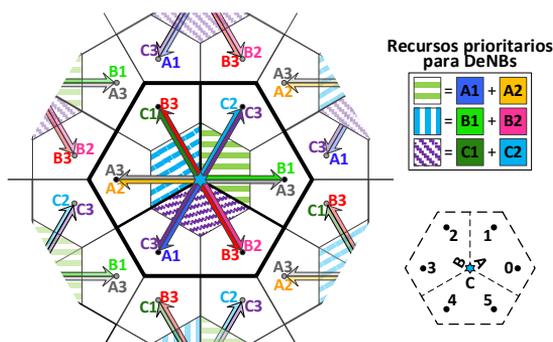


Figura 4.17: RA del esquema Back_op3 para DeNBs en subtramas backhaul (2 RNs por sector)

El concepto principal de la estrategia Back_op3 (Figura 4.17) es que cada GrRB asignado a los enlaces backhaul, se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB. De la misma forma que en la estrategia Back_op2, tres grupos de recursos se utilizan dos veces por enlaces backhaul opuestos (grupos A3, B3 y C3). Después, para completar la asignación de los enlaces backhaul, y con el objetivo de minimizar la interferencia intra-celular, se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto. Si por ejemplo nos centramos en el RN3 y el RN4, estos relays utilizan los grupos A2 y A1 respectivamente, que son los GrRBs que asignará prioritariamente su sector opuesto (sector A) a sus mUEs. Los RNs emplean una antena directiva para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente reducida. Además, hay que tener en cuenta que la asignación de recursos se ha planificado para conseguir que las condiciones de interferencia sufridas por todos los enlaces backhaul sean similares.

Respecto a los enlaces directos, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular degradará las condiciones de interferencia observadas por los mUEs. A nivel del propio DeNB, el reuso de RBs entre sectores provoca la aparición de interferencia intra-celular, sin embargo, como cada RB asignado a los enlaces backhaul puede ser reutilizado un máximo de dos veces en el mismo DeNB, el scheduler tratará de asignar a los mUEs aquellos RBs en los que la interferencia intra-celular es más leve. Analizando también los DeNBs adyacentes, la interferencia inter-celular es también más severa. No obstante, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular persigue compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul y aumentar la disponibilidad de RBs para los enlaces directos, pudiendo compensar la degradación de las condiciones de interferencia de los mUEs. Debido al incremento en el reuso frecuencial de los DeNBs, y con el objetivo de garantizar buenas condiciones de interferencia para los enlaces backhaul, en el esquema Back_op3 el DeNB asigna la misma potencia de

transmisión a todos los RBs del sistema, por lo que no se considera una subbanda exterior de recursos para los enlaces directos.

La asignación de recursos de los DeNBs en el esquema Back_op3, que es compartida entre enlaces directos y backhaul, sigue la ordenación representada en la Figura 4.16, pero incorporando esquemas de reuso frecuencial intra-celular para mejorar la eficiencia espectral. Por lo tanto, los mUEs son asignados preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, un sector solo puede asignar en sus enlaces directos un RB planificado para otro sector cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular adicional. Es decir, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Continuando con la filosofía aplicada en el esquema FFR_2GrRBs para las subtramas de acceso, en el esquema Back_op3 no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

4.4.2 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: SFR_2GrRBs

Tal y como se ha visto en el esquema FFR_2GrRBs, si solo se considera un patrón de celda en la asignación de recursos, y los RNs utilizan los recursos planificados para los otros sectores de sus propios DeNBs, los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes siempre interferirán esos recursos reutilizados por los RNs. Además, los relays no pueden utilizar los recursos frecuenciales reservados para la subbanda exterior, ya que los rUEs recibirían una interferencia excesiva en esos recursos, proveniente tanto de la propia celda, como de las adyacentes. Por lo tanto, si se modifican los recursos que se planifican para cada sector en las diferentes celdas, definiendo tres patrones de celda diferentes, se pueden asignar recursos frecuenciales a los relays, en los que la interferencia que se recibe de las celdas adyacentes es más débil. Siguiendo esta idea se propone el esquema SFR_2GrRBs, representado en la Figura 4.18. El inconveniente del esquema SFR_2GrRBs es que la ICI que sufren los mUEs es más elevada. Si por ejemplo se toma como referencia el sector A de la celda 1, los tres grupos de recursos (A1, A2 y A3) son interferidos por los sectores interferentes dominantes las celdas adyacentes, que son los sectores B y C de las celdas 2 y 3. Por el contrario, si se define un único patrón de celda, como en el caso del esquema FFR_2GrRBs, los sectores B y C de las celdas vecinas utilizaran potencialmente otros GrRBs diferentes. A pesar de que las condiciones de interferencia observadas por los mUEs serán peores en el

esquema SFR_2GrRBs, las posibilidades que ofrece para proporcionar recursos frecuenciales a los enlaces de acceso con mejores condiciones de interferencia hacen interesante la consideración de este esquema.

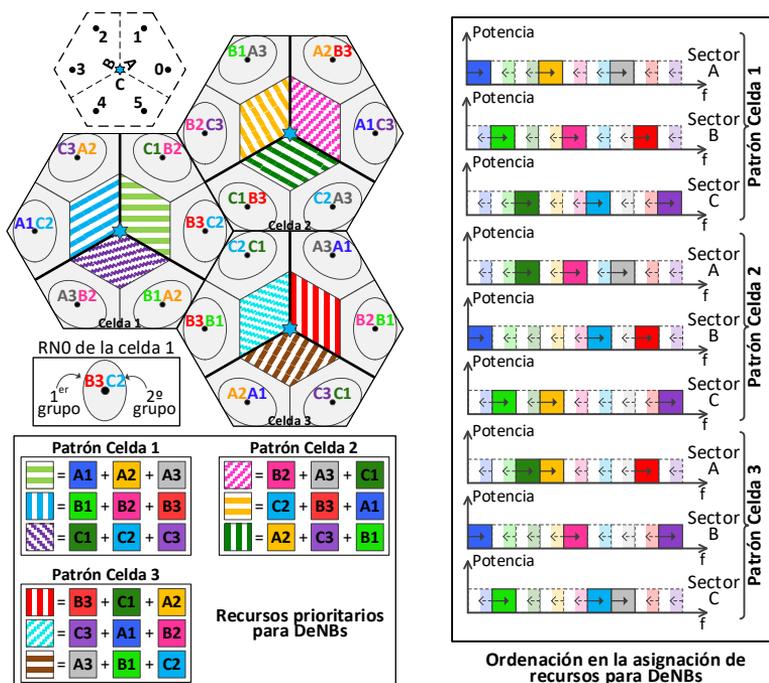


Figura 4.18: RA del esquema SFR_2GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

Si se consideran las dos opciones de ordenación en la asignación de recursos de los DeNBs mostradas en la Figura 4.12, la mejor elección para el esquema SFR_2GrRBs sería aplicar sectorización estricta en las subbandas exteriores (Figura 4.12(b)). El objetivo de esta elección sería permitir que los RNs reutilicen para sus enlaces de acceso RBs de la subbanda exterior de su propio DeNB. Ya que, si se aplica sectorización estricta en la subbanda exterior, se protege a los RNs de que su propio sector utilice los mismos RBs, ya que se transmite con una potencia mayor en la subbanda exterior. Sin embargo, en la Figura 4.18 se representa otra solución alternativa. Esta ordenación en la asignación de recursos de los DeNBs sigue el mismo planteamiento que el aplicado en los esquemas previos, con la diferencia de que se asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema. Por lo tanto, no se está considerando una subbanda exterior de recursos de forma explícita. Esta solución alternativa facilita futuras expansiones de los enlaces de acceso de los RNs, que se proponen en los siguientes esquemas de ICIC, definidos en los siguientes subapartados. Esta alternativa está alineada con la propuesta

desarrollada en el esquema SFR_bm_op1, pero asumiendo una mayor disponibilidad de recursos, tanto en los DeNBs como en los RNs. Por otro lado, continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

El objetivo del esquema SFR_2GrRBs es escoger para cada RN, aquellos grupos de recursos que no están planificados para sus sectores interferentes dominantes de las celdas vecinas, al mismo tiempo que se evitan los grupos que serán empleados potencialmente por su propio sector. El objetivo es proporcionar a los enlaces de acceso de los RNs, recursos en los que la interferencia cross-layer recibida sea minimizada. Si se aplica este planteamiento, para cada relay solo se pueden escoger tres grupos de recursos. Además, estos grupos son los mismos para los tres RNs pertenecientes a las tres celdas adyacentes. Si por ejemplo se toman como referencia el RN0 de la celda 1, el RN4 de la celda 2 y el RN2 de la celda 3, este planteamiento conlleva que estos tres RNs tienen que compartir los grupos de recursos B3, C1 y C2. El reparto de recursos se realiza de tal forma que cada uno de estos tres GrRBs es reutilizado por dos de los tres RNs pertenecientes a las celdas adyacentes, con el objetivo de minimizar la interferencia co-layer. Además, esta elección de los GrRBs asignados a cada relay también permite reducir el reuso frecuencial entre relays vecinos de la propia celda. Esta filosofía de tratar de reducir el reuso frecuencial entre relays vecinos lo máximo posible también se ha aplicado en el esquema FFR_2GrRBs, y tiene como objetivo minimizar la interferencia co-layer. De igual manera que en los esquemas previos, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

En el esquema SFR_2GrRBs se han escogido para los enlaces de acceso de los RNs los grupos de recursos que no son potencialmente asignados por los principales sectores interferentes, con el objetivo de reducir la interferencia cross-layer recibida por los rUEs. Hay que tener en cuenta que en condiciones de carga heterogéneas los sectores pueden asignar recursos inicialmente planificados para otros sectores de su DeNB. Especial impacto tiene cuando el propio sector que da servicio a un RN asigna RBs planificados para otro sector, que también son asignados por el RN, ya que la interferencia recibida por los rUEs en esos RBs es bastante elevada, reduciendo notablemente sus prestaciones.

Con el objetivo de proponer una estrategia para las subtramas backhaul adecuada al esquema propuesto para las subtramas de acceso basado en SFR (SFR_2GrRBs), en la estrategia Back_op4 (Figura 4.19(a)) se han definido tres patrones de celda diferentes. Se ha seguido la misma filosofía y las mismas restricciones que en el esquema Back_op3, de tal forma que cada GrRB

asignado a los enlaces backhaul, se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB. En cada DeNB, tres grupos de recursos se utilizan dos veces por enlaces backhaul opuestos, siendo estos grupos el A3, B3, y C3 en el caso de la celda 1. Para completar la asignación de los enlaces backhaul se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto al RN, para minimizar la interferencia intra-celular. Si se toman como referencia el RN3 y el RN4 de la celda 1, estos relays utilizan los grupos A1 y A2 respectivamente, que son los GrRBs que asignará prioritariamente su sector opuesto (sector A) a sus mUEs. Los RNs emplean una antena directiva para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente reducida. Respecto a los enlaces directos, la situación es similar a la explicada en el esquema Back_op3, y la degradación de las condiciones de interferencia de los mUEs podría compensarse con el aumento en la disponibilidad de RBs para los enlaces directos.

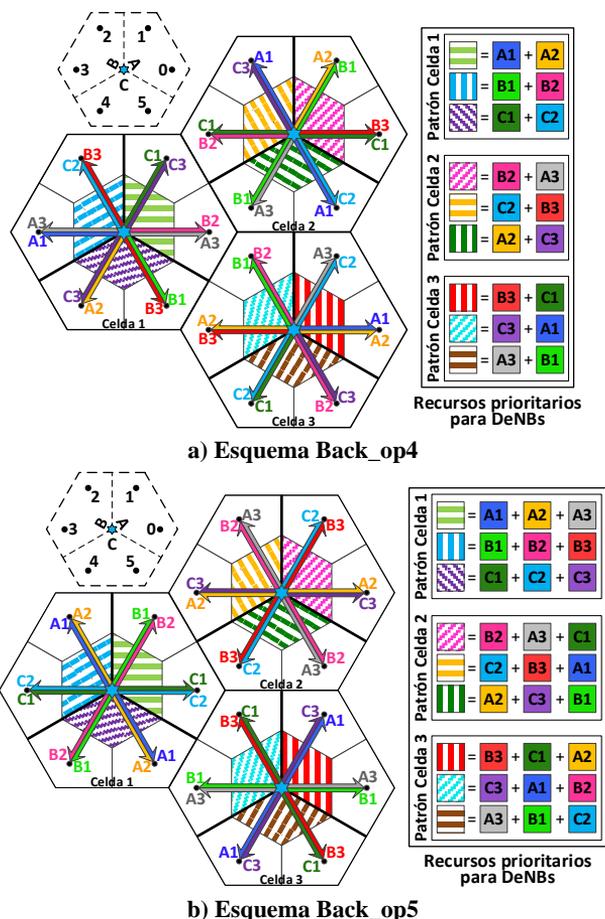


Figura 4.19: RA para DeNBs en subtramas backhaul: Back_op4 y Back_op5 (2 RNs por sector)

En el esquema Back_op4 la asignación de recursos de los DeNBs sigue la ordenación representada en la Figura 4.18, pero incorporando esquemas de reuso frecuencial intra-celular para mejorar la eficiencia espectral. Siguiendo el planteamiento aplicado en el esquema Back_op3, y con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, un sector solo puede asignar en sus enlaces directos un RB planificado para otro sector cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular adicional. Es decir, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto.

En el esquema Back_op5 (Figura 4.19(b)) se da un paso más y se aumenta el reuso frecuencial, permitiendo que algunos grupos de recursos sean asignados por los tres sectores de la celda. En cada celda, seis GrRBs se reutilizan tres veces, de tal forma que cada uno de estos grupos es asignado a enlaces backhaul opuestos en dos sectores, mientras que el sector restante lo asigna a sus mUEs. Si se toma como referencia la celda 1, los grupos A1, A2, B1, B2, C1 y C2 son asignados por los tres sectores de la celda. Por ejemplo, los grupos A1 y A2 son asignados a los enlaces backhaul del RN2 y del RN5, que son opuestos, y además son potencialmente asignados a los mUEs del sector A. Los tres GrRBs restantes se utilizan únicamente una vez en la celda, para poder proporcionar recursos con niveles de interferencia más bajos a los mUEs que observan malas condiciones de canal (en el caso de la celda 1, son los grupos A3, B3 y C3). Además, hay que tener en cuenta que estas estrategias de RA propuestas para las subtramas backhaul se han planificado para conseguir que las condiciones de interferencia sufridas por todos los enlaces backhaul sean similares.

Si se compara con el esquema Back_op4, las condiciones de interferencia de los enlaces backhaul son peores ya que los GrRBs planificados para los enlaces backhaul pueden ser asignados por los tres sectores del DeNB de forma simultánea. Respecto a los enlaces directos, se han reservado tres GrRBs que solo serán asignados por un sector de la celda, ya que los seis GrRBs restantes pueden ser asignados por los tres sectores de la celda, sufriendo los mUEs fuertes niveles de interferencia en esos recursos. Será necesario comprobar si el agresivo reuso frecuencial del esquema Back_op5 permite compensar este incremento de los niveles de interferencia de los enlaces backhaul y directos, con la mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos.

De la misma forma que en el esquema Back_op4, la asignación de recursos de los DeNBs sigue la ordenación representada en la Figura 4.18, de tal forma que los mUEs son asignados preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. En el caso del esquema Back_op5, seis GrRBs son reutilizados tres veces, asignándose a dos enlaces

backhaul opuestos y a los enlaces directos del sector restante. Un sector podrá asignar a sus enlaces directos un RB perteneciente a estos seis grupos, y que este planificado para otro de los sectores, si ese RB no ha sido asignado a los enlaces backhaul de los RNs a los que ese sector da servicio.

Continuando con la filosofía aplicada en el esquema SFR_2GrRBs, en ambos esquemas de RA propuestos para las subtramas backhaul, Back_op4 y Back_op5, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Además, de la misma forma que en el esquema Back_op3, en los esquemas Back_op4 y Back_op5 el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema, con el objetivo de ofrecer mejores condiciones de interferencia para los enlaces backhaul.

4.4.3 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector y reuso de RBs en RNs vecinos: FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs

En el esquema FFR_2GrRBs (Figura 4.16) se asignan dos grupos de recursos a los enlaces de acceso de cada relay, con lo que no existe interferencia co-layer entre los RNs pertenecientes al mismo sector del DeNB. Sin embargo, podría ser interesante considerar un mayor reuso frecuencial entre RNs vecinos, ya que el incremento en la interferencia co-layer podría compensarse con la mayor disponibilidad de recursos en los RNs. Por lo tanto, con el objetivo de incrementar todavía más el reuso frecuencial de la red, en la Figura 4.20 se representa el esquema de ICIC propuesto, basado en FFR. Se han propuesto dos versiones. En la primera de ellas, cada relay puede asignar sus enlaces de acceso en tres GrRBs (FFR_3GrRBs), mientras que la segunda versión consiste en añadir un cuarto GrRB a cada relay (FFR_4GrRBs). En la Figura 4.20 se representa qué grupo se escoge en primer lugar. En ambos esquemas se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.20, que es la misma que la aplicada en el esquema FFR_2GrRBs. De tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs de la subbanda interior que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs de la subbanda interior de la celda son accesibles. La sectorización estricta en la subbanda exterior es necesaria para proteger a los mUEs de los bordes de las celdas. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

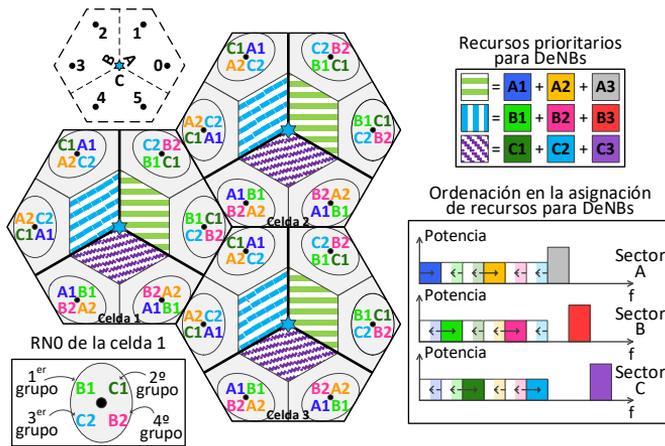


Figura 4.20: RA de los esquemas FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

En este esquema de ICIC y RA se sigue el mismo planteamiento que el aplicado en el esquema FFR_2GrRBs. Es decir, la propuesta se basa en que cada relay reutiliza, para sus enlaces de acceso, los grupos de recursos que pertenecen a la subbanda interior de su propio DeNB, escogiendo los GrRBs que no están planificados para su propio sector, y asignando diferentes GrRBs a RNs adyacentes, siempre que sea posible. Por lo tanto, siguiendo este planteamiento, hay cuatro grupos de recursos a repartir para los relays de cada sector. Si se toma como referencia el sector A de la celda 1, los grupos que pueden ser asignados a los enlaces de acceso del RN0 y del RN1 son los grupos B1, B2, C1 y C2. Los dos primeros grupos asignados a los enlaces de acceso de los relays, son los seleccionados en el esquema FFR_2GrRBs. Es decir, se asigna un GrRB planificado para el sector adyacente, y otro GrRB planificado para el sector opuesto. Una vez asignados los dos primeros grupos, si nos centramos en el caso concreto del RN0 de la celda 1, los grupos que quedan disponibles son el B2 y el C2. La asignación del tercer GrRB genera interferencia co-layer principalmente entre los RNs pertenecientes al mismo sector de la celda. Para cada RN se escoge el grupo de recursos potencialmente planificado para su sector adyacente, ya que, aunque se reciba mayor interferencia de su DeNB, esta elección permite reducir la interferencia co-layer generada con el resto de RNs vecinos. Finalmente, con la asignación del cuarto grupo de recursos disponible en cada RN, se alcanza el reuso frecuencial completo entre los RNs pertenecientes al mismo sector de la celda. La elección de recursos frecuenciales propuesta, además de intentar minimizar la interferencia generada, para mejorar las prestaciones del sistema, también tiene como objetivo lograr que las prestaciones de todos los relays de la celda sean similares, proporcionando RBs con condiciones de interferencia similares a todos los relays. De igual manera que en

los esquemas previos, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

4.4.4 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs

Tal y como se ha visto en los esquemas basados en FFR, si solo se considera un patrón de celda en la asignación de recursos y los RNs utilizan los recursos planificados para los otros sectores de sus propios DeNBs, los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes siempre interferirán esos recursos reutilizados por los RNs. Además, los relays no pueden emplear los recursos frecuenciales reservados para la subbanda exterior, ya que los rUEs recibirían una interferencia excesiva en esos recursos. Con el objetivo de proporcionar a los relays recursos frecuenciales en los que la interferencia que se recibe de las celdas adyacentes es más débil, y continuando con la filosofía mostrada en el esquema SFR_2GrRBs, en la Figura 4.21 se representa el esquema de ICIC propuesto, basado en SFR. Se han propuesto dos versiones, que buscan incrementar todavía más el reuso frecuencial de la red, aumentando los recursos disponibles para los enlaces de acceso de los RNs. En la primera versión cada relay puede asignar sus enlaces de acceso en tres GrRBs (SFR_3GrRBs), mientras que la segunda versión consiste en añadir un cuarto GrRB a cada relay (SFR_4GrRBs). En la Figura 4.21 se representa qué grupo se escoge en primer lugar. En ambos esquemas se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.21, que es la misma que la aplicada en el esquema SFR_2GrRBs. De tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs de la celda son accesibles. Además, siguiendo el mismo planteamiento que en el esquema SFR_2GrRBs, no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema. Esta solución facilita el incremento del reuso frecuencial de la red buscado en la propuesta de ambos esquemas, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

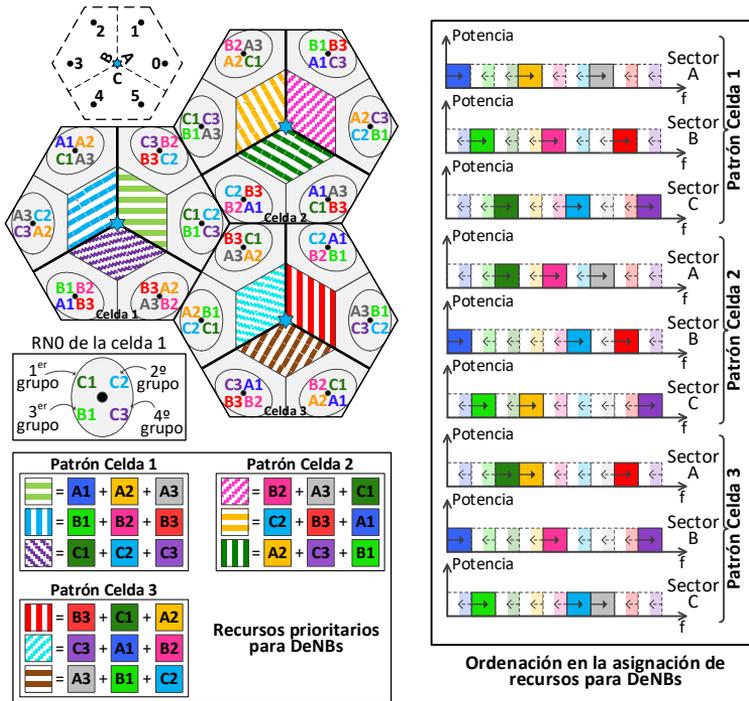


Figura 4.21: RA de los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

De la misma forma que en el esquema SFR_2GrRBs, el objetivo de los esquemas de RA propuestos, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs, es proporcionar a los enlaces de acceso de los RNs recursos en los que la interferencia cross-layer recibida sea minimizada. Para ello se intenta escoger para cada RN aquellos grupos de recursos que no están planificados para sus sectores interferentes dominantes de las celdas vecinas, al mismo tiempo que se evitan los grupos que serán empleados potencialmente por su propio sector. Si en primer lugar nos centramos en los GrRBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de las celdas vecinas, para cada relay solo se pueden escoger tres grupos de recursos. Además, estos grupos son los mismos para los tres RNs pertenecientes a las tres celdas adyacentes. Si se toman como referencia el RN0 de la celda 1, el RN4 de la celda 2 y el RN2 de la celda 3, los tres relays tienen que compartir los grupos B3, C1 y C2. De cara a asignar los dos primeros GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN, la solución propuesta es que cada uno de los tres grupos disponibles sea reutilizado por solo dos de los tres relays considerados, con el objetivo de que la interferencia co-layer generada no sea excesiva. Esta filosofía es la misma que la que se ha aplicado en el esquema SFR_2GrRBs, con la diferencia de que el reparto de los tres GrRBs es diferente. Si por ejemplo se toma como referencia el RN0 de la celda 1, este relay emplea

los grupos C1 y C2, en lugar de los grupos B3 y C2, empleados en el esquema SFR_2GrRBs. Aunque las prestaciones de estos dos primeros GrRBs planificados en los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs son peores, el objetivo de este cambio en la distribución de recursos es garantizar condiciones de interferencia homogéneas para todos los relays, cuando se añadan el tercer y cuarto grupo de recursos a sus enlaces de acceso.

Para añadir el tercer GrRB a los enlaces de acceso de los relays, se han seleccionado aquellos recursos en los que la interferencia proveniente de las celdas adyacentes es menor. Tomando como referencia el RN0 de la celda 1, se podría escoger entre los grupos B1, B2, B3 y C3, ya que se evitan los GrRBs potencialmente empleados por el propio sector A. El grupo B1 es interferido por el sector C de la celda 2, el grupo B2 es interferido por el sector B de la celda 3, el grupo B3 ya está asignado al RN4 de la celda 2 y al RN2 de la celda 3, y finalmente, el grupo C3 es interferido por los dos sectores de las celdas adyacentes (sector C de la celda 2 y sector B de la celda 3). Si se seleccionase el grupo B3, los tres RNs vecinos de los DeNBs adyacentes utilizarían los mismos tres grupos, provocando que la interferencia co-layer fuera demasiado fuerte. Si se realiza el mismo análisis en el resto de relays, se observa que para el caso del RN0 de la celda 1, los grupos que reciben menor nivel de interferencia de las celdas adyacentes son los grupos B1 y B2, para el caso del RN4 de la celda 2 estos grupos son el A3 y el B2, y finalmente para el caso del RN2 de la celda 3, estos grupos son el A3 y el B1. Para cada RN se selecciona un grupo de recursos diferente, de tal forma que esta elección no introduce interferencia co-layer adicional entre los RNs vecinos de celdas adyacentes. De esta forma, cada relay dispone de tres grupos de recursos para sus enlaces de acceso, en los que se ha tratado de minimizar la interferencia recibida de celdas adyacentes, así como asignar diferentes GrRBs a relays vecinos cuando es posible, para reducir la interferencia co-layer.

Finalmente, de cara a añadir el cuarto grupo de recursos a los enlaces de acceso de cada RN (SFR_4GrRBs), el objetivo es que el número de recursos que son reutilizados por relays vecinos sea el menor posible, para minimizar la interferencia co-layer. Si se toma como referencia el RN0 de la celda 1, los tres grupos que aún estarían disponibles serían el B2, el B3 y el C3. Como los grupos B2 y B3 ya están asignados en los relays interferentes dominantes, tanto de la propia celda, como de las celdas adyacentes, se escoge el grupo C3, a pesar de que la interferencia cross-layer proveniente de celdas adyacentes es más elevada. De esta forma se trata de evitar que la interferencia co-layer entre RNs vecinos sea excesiva, y se empeoren las prestaciones de los rUEs. Incrementando la disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces de acceso de los RNs se puede mejorar la flexibilidad en la asignación de recursos, y, como consecuencia, se puede mejorar las prestaciones del sistema, incluso a pesar de

que la interferencia generada es más fuerte. Continuando con la filosofía de los esquemas previos, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

4.4.5 Esquema basado en FFR, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: FFR_2GrRBs, FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs

Los esquemas de ICIC y RA que se han presentado en los subapartados anteriores se basan en el despliegue de dos RNs en cada sector del DeNB. Sin embargo, el despliegue de un mayor número de RNs en los DeNBs puede incrementar la ganancia potencial de los despliegues heterogéneos con relays. Al aumentar el número de RNs desplegados, un mayor número de usuarios pueden beneficiarse de unas mejores condiciones de canal al estar conectados a un RN, mejorando sus prestaciones. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que desplegar un mayor número de RNs en cada DeNB complica los esquemas de reparto de recursos frecuenciales, ya que será necesario incrementar todavía más el reuso frecuencial dentro de la celda, para compensar los recursos frecuenciales que son empleados en los enlaces backhaul. Por lo tanto, es necesario realizar un reparto de recursos adecuado entre los diferentes nodos y enlaces, para evitar que el incremento en el reuso frecuencial empeore excesivamente las condiciones de interferencia de los usuarios, y para obtener la ganancia potencial derivada del despliegue de un mayor número de relays.

En la Figura 4.22 se representa el esquema de ICIC basado en FFR adaptado a la configuración de 4 RNs por sector. Se han propuesto tres versiones. En la primera de ellas, cada relay asigna sus enlaces de acceso en dos GrRBs (FFR_2GrRBs), mientras que en la segunda versión se añade un tercer GrRB a cada relay (FFR_3GrRBs), y finalmente, en la tercera versión se añade un cuarto GrRB (FFR_4GrRBs). En la Figura 4.22 se representa qué grupo se escoge en primer lugar. En los tres esquemas se aplica la misma ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs, que la que se aplica en los esquemas basados en FFR propuestos para la configuración de 2 RNs por sector, y se representa en la Figura 4.22. De tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs de la subbanda interior que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs de la subbanda interior de la celda son accesibles. La sectorización estricta en la subbanda exterior es necesaria para proteger a los mUEs de los bordes de las celdas. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda.

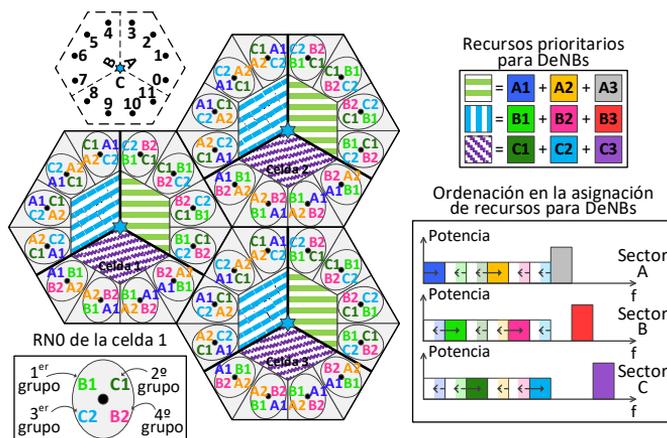


Figura 4.22: RA de los esquemas FFR_2GrRBs, FFR_3GrRBs y FFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (4 RNs por sector)

Siguiendo la misma filosofía que en los esquemas de ICIC basados en FFR propuestos para la configuración de 2 RNs por sector (Figura 4.16 y Figura 4.20), cada RN reutiliza en sus enlaces de acceso los grupos de recursos pertenecientes a la subbanda interior de su propio DeNB, seleccionando los grupos que no son usados prioritariamente por su propio sector, y asignando diferentes GrRBs a RNs adyacentes, siempre que sea posible. Por lo tanto, aplicando este planteamiento hay cuatro grupos de recursos para repartir entre los RNs de cada sector. Si se toma como referencia el sector A, los grupos son el B1, B2, C1 y C2, ya que son los grupos que serán asignados prioritariamente por los sectores B y C. Merece la pena recordar que, tal y como se ha visto en los esquemas basados en FFR propuestos para la configuración de 2 RNs por sector, como solo se considera un patrón de celda, y los RNs utilizan los recursos planificados para los otros sectores de su propio DeNB, los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes siempre interferirán esos recursos reutilizados por los RNs. Por lo tanto, el principal objetivo del esquema de RA es repartir estos recursos de tal forma que los RNs vecinos que más se interfieren entre ellos empleen diferentes grupos de recursos en la medida de lo posible, para minimizar la interferencia co-layer.

Para la asignación del primer GrRB a los enlaces de acceso de cada RN, se escoge un grupo que será asignado potencialmente a los mUEs del sector opuesto al relay, minimizando la interferencia cross-layer. Se asigna un grupo diferente para cada RN del sector, de tal forma que cada uno de los cuatro grupos disponibles es asignado únicamente a un RN del sector. Además, los grupos se reparten entre los diferentes RNs de cada sector de tal forma que los RNs vecinos que más se interfieren entre ellos, tanto de la propia celda como de celdas adyacentes, utilizan grupos diferentes, permitiendo reducir la

interferencia co-layer. En la asignación del segundo GrRB a cada RN se sigue una estrategia similar, realizando el reparto de tal forma que se intenta minimizar la interferencia co-layer, asignando grupos diferentes a los principales RNs interferentes dominantes. En este caso se escoge un GrRB planificado para los enlaces directos del sector adyacente, ya que esta elección permite realizar un mejor reparto de recursos entre relays vecinos, evitando que la interferencia co-layer sea excesiva. Eso es debido a que, si se escoge para los enlaces de acceso de cada relay el otro grupo de recursos planificado para el sector opuesto, cuatro RNs adyacentes pertenecientes a la misma celda emplearían los mismos dos GrRBs. Si se toman como referencia los RNs opuestos al sector B de la celda 1 (RN0, RN1, RN10 y RN11), los cuatro RNs asignarían recursos a sus rUEs de los grupos B1 y B2.

De cara a añadir el tercer GrRB a los enlaces de acceso de los RNs, ya solo quedan disponibles dos grupos de los cuatro asignables. Se escoge el otro GrRB planificado para los enlaces directos del sector adyacente, ya que esta elección permite conseguir un mejor reparto de recursos entre relays vecinos, reduciendo la interferencia co-layer. Con la asignación de este tercer grupo el reuso de recursos frecuenciales entre RNs vecinos comienza a ser elevado. Sin embargo, este incremento en la interferencia co-layer generada podría compensarse gracias a que la mayor disponibilidad de recursos en los RNs puede mejorar la flexibilidad en la asignación, y por lo tanto, esto podría traducirse en una mejora de las prestaciones del sistema. Finalmente se asigna a cada RN el último grupo disponible, alcanzando el reuso frecuencial completo entre los RNs pertenecientes al mismo sector de la celda. Continuando con la filosofía de los esquemas propuestos para la configuración de dos RNs por sector, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

En la Figura 4.23 se representa el esquema de RA para las subtramas backhaul Back_op3, adaptado a la configuración de 4 RNs por sector. Siguiendo la misma filosofía que para el caso de la configuración de 2 RNs por sector (Figura 4.17), cada GrRB asignado a los enlaces backhaul, se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB. Tres grupos de recursos se utilizan dos veces por enlaces backhaul opuestos (grupos A3, B3 y C3), mientras que para el resto de enlaces backhaul se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto al RN. Por ejemplo, el RN1 recibirá el enlace backhaul en el grupo B1, que potencialmente será asignado a los mUEs del sector B, que es el sector opuesto al RN1. Con esta estrategia se busca minimizar la interferencia intra-celular, para garantizar niveles de interferencia adecuados a los enlaces backhaul. Los RNs emplean una antena directiva para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente reducida.

En el esquema Back_op3 para la configuración de 4 RNs por sector solo se ha planificado inicialmente un GrRB para cada enlace backhaul, a diferencia de la propuesta para la configuración de 2 RNs por sector, donde se planifican dos GrRBs para cada enlace backhaul. Con el objetivo de aumentar la capacidad de los enlaces backhaul, en la configuración de 4 RNs por sector se podrán asignar a los enlaces backhaul RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector. Para seleccionar los RBs que se asignarán a los enlaces backhaul provenientes de los enlaces directos se continua con la estrategia de reutilizar los recursos asignados por el sector opuesto. Por lo tanto, tomando como ejemplo los RNs del sector A, los RBs del grupo A1 podrán ser asignados a los enlaces backhaul del RN2 y del RN3, puesto que el grupo A1 está planificado para el enlace backhaul del RN9, perteneciente al sector C. Y los RBs del grupo A2 estarán disponibles para los enlaces backhaul del RN0 y del RN1.

Desde el punto de vista de los enlaces directos, y de la misma forma que en el caso de la configuración de 2 RNs por sector, aunque la incorporación de reuso frecuencial intra-celular degradará las condiciones de interferencia observadas por los mUEs, esta degradación podría compensarse gracias al aumento de la disponibilidad de RBs para los enlaces directos. Además, hay que tener en cuenta que la asignación de recursos se ha planificado para conseguir que las condiciones de interferencia sufridas por todos los enlaces backhaul sean similares.

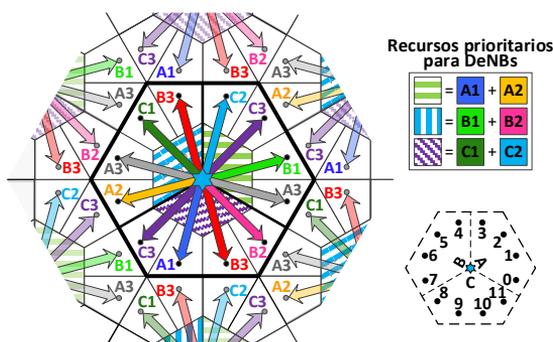


Figura 4.23: RA del esquema Back_op3 para DeNBs en subtramas backhaul (4 RNs por sector)

Hay que destacar, que la asignación de recursos de los DeNBs en las subtramas backhaul (compartida entre enlaces directos y backhaul) sigue la ordenación representada en la Figura 4.22, incorporando esquemas de reuso frecuencial intra-celular para mejorar la eficiencia espectral. Por lo tanto, los mUEs reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs

reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, un sector solo puede asignar en sus enlaces directos un RB planificado para otro sector cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular adicional. Es decir, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas de RA previos, en el esquema Back_op3 no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Además, siguiendo la misma filosofía aplicada en el esquema Back_op3 propuesto para la configuración de 2 RNs por sector, el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

4.4.6 Esquema basado en SFR, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: SFR_2GrRBs, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs

Como se ha visto en la configuración de 2 RNs por sector, en los esquemas basados en FFR, al considerar un único patrón de celda y asignar a los enlaces de acceso de los relays los recursos planificados para los otros sectores de sus propios DeNBs, los recursos reutilizados por los RNs siempre serán interferidos por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Además, no se pueden asignar a los enlaces de acceso los recursos frecuenciales reservados para la subbanda exterior, ya que los rUEs recibirían una interferencia excesiva en esos recursos. En la configuración de 4 RNs por sector es necesario incrementar todavía más el reuso frecuencial dentro de la celda, para compensar los recursos frecuenciales que son empleados en los enlaces backhaul. Por lo tanto, con el objetivo de proporcionar a los relays recursos frecuenciales en los que la interferencia que se recibe de las celdas adyacentes es más débil, para así incrementar la ganancia derivada del despliegue de un mayor número de relays, se ha adaptado el esquema de ICIC basado en SFR a la configuración de 4 RNs por sector. Se han propuesto tres versiones, de tal forma que en la primera versión se asignan dos grupos de recursos a los enlaces de acceso de cada relay (SFR_2GrRBs), en la segunda versión se incrementa a tres los GrRBs asignados a cada relay (SFR_3GrRBs), y finalmente, en la tercera versión se añade un cuarto GrRB (SFR_4GrRBs). En la Figura 4.24 se representa qué grupo se escoge en primer lugar.

En estos esquemas se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.24, de tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs de la celda son accesibles. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas previos,

no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Además, siguiendo el mismo planteamiento que el aplicado en los esquemas basados en SFR propuestos para la configuración de 2 RNs por sector, no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema. Esta propuesta facilita el reparto de recursos entre los enlaces de acceso de los relays, especialmente cuando se busca un elevado reuso frecuencial.

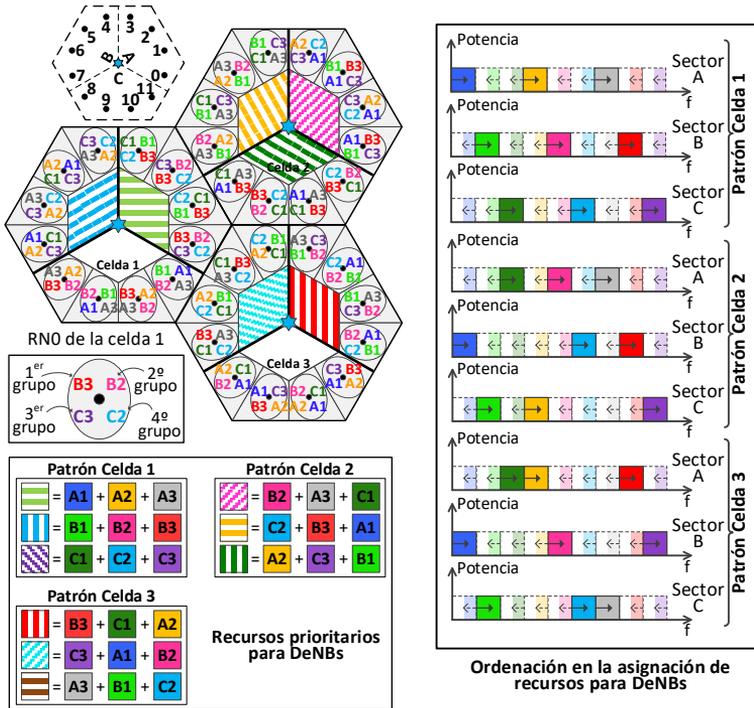


Figura 4.24: RA de los esquemas SFR_2GrRBs, SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (4 RNs por sector)

Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas basados en SFR propuestos para la configuración de 2 RNs por sector, para seleccionar los recursos que se asignan a los enlaces de acceso de los RNs, se evitan los grupos que serán empleados potencialmente por su propio sector, al mismo tiempo que se intenta escoger aquellos grupos de recursos que no están planificados para sus sectores interferentes dominantes de las celdas vecinas. Además, siempre que sea posible, se asignan diferentes grupos de recursos a relays vecinos. Para seleccionar el primer grupo de recursos asignado a los relays se escogen aquellos GrRBs que no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, minimizando la interferencia cross-layer. Si se toman como referencia el RN0 y el RN1 de la celda 1, el RN8 y el RN9 de

la celda 2, y el RN4 y el RN5 de la celda 3, aplicando esta estrategia los seis relays tienen que compartir los grupos B3, C1 y C2. Estos tres GrRBs se asignan a los RNs en rotación, para que los relays que utilizan el mismo grupo sean los que se encuentran más alejados entre ellos, reduciendo la interferencia co-layer. Además, el reparto de recursos también tiene en cuenta que se asignen diferentes grupos al resto de relays vecinos.

De cara a añadir el segundo GrRB, y con el objetivo de limitar los recursos frecuenciales que son reutilizados entre RNs vecinos, a determinados relays se les asigna un grupo planificado para uno de los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, mientras que a los relays restantes se les asigna uno de los tres grupos que no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. El RN0 de la celda 1 recibe el grupo B2, que es un grupo planificado para el sector B de la celda 3, mientras que el RN1 de la celda 1 recibe el grupo C1, que es uno de los grupos no planificados para los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. De forma similar, el RN8 de la celda 2 y el RN4 de la celda 3 reciben los grupos A3, planificado para el sector A de la celda 1, y B1, planificado para el sector C de la celda 2, respectivamente, mientras que el RN9 de la celda 2 y el RN5 de la celda 3 reciben los grupos C2 y B3 respectivamente, que son grupos no planificados para los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Sin embargo, aunque algunos relays reciban un grupo de recursos que es potencialmente interferido por uno de los sectores interferentes dominantes, estos grupos no son empleados por los RNs vecinos. Por lo tanto, con esta elección se evita incrementar demasiado el reuso frecuencial entre RNs vecinos, reduciendo la interferencia co-layer generada por la asignación del segundo GrRB a los enlaces de acceso de los relays.

Siguiendo un planteamiento similar, para la asignación del tercer grupo de recursos a los enlaces de acceso se seleccionan grupos que serán asignados prioritariamente por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Aunque estos recursos reciban mayor interferencia de las celdas adyacentes, esta estrategia permite conseguir un mejor reparto de recursos entre relays vecinos, evitando que el reuso frecuencial entre RNs adyacentes sea excesivo. Finalmente, para la elección del cuarto GrRB, determinados relays reciben aquellos recursos que no son interferidos por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Mientras que los relays restantes reciben recursos frecuenciales que son asignados prioritariamente por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. El objetivo de este esquema de ICIC es intentar asignar a los relays aquellos recursos menos interferidos por las celdas adyacentes, al mismo tiempo que se intenta minimizar los recursos reutilizados por RNs vecinos, para evitar que el reuso frecuencial entre RNs vecinos sea excesivo. De la misma forma que en los esquemas previos, el reparto

de recursos busca la asignación de recursos con similares condiciones de interferencia a todos los relays del sistema. Y continuando también con la filosofía de los esquemas previos, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

En la Figura 4.25 se describe el esquema de RA para las subtramas backhaul Back_op4, adaptado a la configuración de 4 RNs por sector. Siguiendo la misma filosofía que para el esquema de la configuración de 2 RNs por sector (Figura 4.19(a)), se han definido tres patrones de celda diferentes y cada GrRB asignado a los enlaces backhaul, se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB. En cada celda se definen tres grupos de recursos, los cuales se utilizan dos veces por enlaces backhaul opuestos (en el caso de la celda 1 son los grupos A3, B3 y C3), mientras que para el resto de enlaces backhaul se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto al RN. Con esta estrategia se busca minimizar la interferencia intra-celular, para garantizar niveles de interferencia adecuados para los enlaces backhaul. Los RNs emplean una antena direccional para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente reducida.

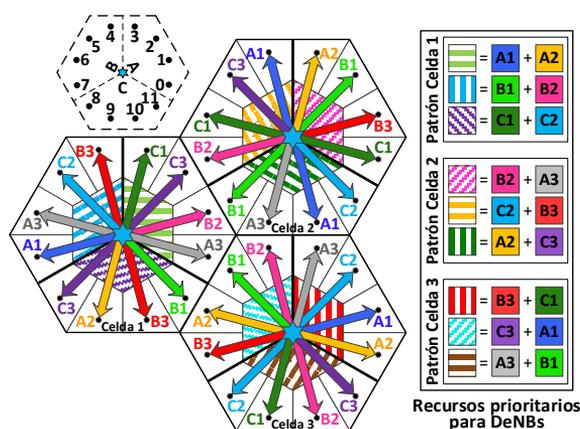


Figura 4.25: RA del esquema Back_op4 para DeNBs en subtramas backhaul (4 RNs por sector)

De la misma forma que en el esquema Back_op3 para la configuración de 4 RNs por sector (Figura 4.23), se ha planificado inicialmente un único GrRB para cada enlace backhaul. Para incrementar la capacidad de los enlaces backhaul se podrán asignar a los enlaces backhaul RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector. Para seleccionar los RBs que se asignarán a los enlaces backhaul provenientes de los enlaces directos se continua con la estrategia de reutilizar los recursos asignados por el sector opuesto. Desde el punto de vista de los enlaces directos, y de la misma forma que en el caso de la configuración de 2 RNs por sector, aunque la incorporación de reuso frecuencial

intra-celular degradará las condiciones de interferencia observadas por los mUEs, esta degradación podría compensarse gracias al aumento de la disponibilidad de RBs para los enlaces directos.

Además, merece la pena destacar que la asignación de recursos de los DeNBs en las subtramas backhaul (compartida entre enlaces directos y backhaul) sigue el esquema representado en la Figura 4.24, incorporando esquemas de reuso frecuencial intra-celular para mejorar la eficiencia espectral. Por lo tanto, los mUEs reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, un sector solo puede asignar en sus enlaces directos un RB planificado para otro sector cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular adicional. Es decir, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas de RA previos, en el esquema Back_op4 no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Además, siguiendo la misma filosofía aplicada en el esquema Back_op4 propuesto para la configuración de 2 RNs por sector, el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

4.4.7 Resultados

En este subapartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para los esquemas de ICIC y RA que se han propuesto para despliegues relays. Estos esquemas se han propuesto con el objetivo de incrementar el reuso frecuencial para mejorar la eficiencia en el uso del espectro, y conseguir mejorar las prestaciones del sistema, tomando como punto de referencia las estrategias preliminares basadas en la literatura que se han analizado en el apartado 4.3. Para la evaluación de los esquemas de ICIC propuestos se continúan empleando las mismas condiciones de simulación, explicadas en el subapartado 4.3.3.1 y quedando recogidos los parámetros generales de simulación en la Tabla 4.1. Además, en la Tabla 4.6 se incluyen los valores de las máscaras de potencia expresadas en dBm/RB para los esquemas de ICIC propuestos que se van a evaluar en este subapartado.

Esquema	$N_{total,int,c}$	$N_{total,ext,c}$	$N_{total,r}$	$M_{med,c}^{int}$	$M_{med,c}^{ext}$	$M_{med,r}$
2 RNs por sector						
FFR_2GrRBs-Back_op3(5 RBs)	18 / 51	9 / 0	6	25.92	28.92	29.22
FFR_2GrRBs-Back_op3(4 RBs)	18 / 48	9 / 0	6	26.19	29.19	29.22
FFR_3GrRBs-Back_op3(5 RBs)	18 / 51	9 / 0	9	25.92	28.92	27.46
FFR_4GrRBs-Back_op3(5 RBs)	18 / 51	9 / 0	12	25.92	28.92	26.21
SFR_2GrRBs-Back_op3(6 RBs)	27 / 54	0 / 0	6	25.68	0	29.22
SFR_2GrRBs-Back_op4(6 RBs)	27 / 54	0 / 0	6	25.68	0	29.22
SFR_2GrRBs-Back_op5(6 RBs)	27 / 63	0 / 0	6	25.01	0	29.22
SFR_2GrRBs-Back_op4(5 RBs)	27 / 51	0 / 0	6	25.92	0	29.22
SFR_2GrRBs(2 NPTs)- Back_op4(5 RBs)	18 / 51	9 / 0	6	25.92	28.92	29.22
SFR_3GrRBs-Back_op4(6 RBs)	27 / 54	0 / 0	9	25.68	0	27.46
SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs)	27 / 54	0 / 0	12	25.68	0	26.21
4 RNs por sector						
FFR_2GrRBs-Back_op3(4 RBs)	18 / 54	9 / 0	6	25.68	28.68	29.22
FFR_3GrRBs-Back_op3(4 RBs)	18 / 54	9 / 0	9	25.68	28.68	27.46
FFR_4GrRBs-Back_op3(4 RBs)	18 / 54	9 / 0	12	25.68	28.68	26.21
SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs)	27 / 54	0 / 0	6	25.68	0	29.22
SFR_3GrRBs-Back_op4(4.5 RBs)	27 / 54	0 / 0	9	25.68	0	27.46
SFR_4GrRBs-Back_op4(4.5 RBs)	27 / 54	0 / 0	12	25.68	0	26.21

Tabla 4.6: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC propuestos [dBm/RB]

4.4.7.1 Esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs

En la Tabla 4.7 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para las tres alternativas propuestas para las subtramas backhaul: Back_op3, Back_op4 y Back_op5 (Figura 4.17 y Figura 4.19). Con el objetivo de poder aislar mejor las diferencias entre las tres alternativas, se emplea el mismo esquema de ICIC para las subtramas de acceso en los tres casos: SFR_2GrRBs (Figura 4.18). Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. A modo de referencia se sigue representando el porcentaje de ganancia que proporcionan los diferentes esquemas de ICIC para despliegues de relays respecto al throughput alcanzado por el despliegue macrocelular convencional.

El objetivo detrás de las tres alternativas propuestas para las subtramas backhaul es incrementar el reuso frecuencial para aumentar la capacidad de los enlaces backhaul, y así poder satisfacer el throughput agregado de los rUEs en

los esquemas de ICIC propuestos, en los que se ha incrementado la cantidad de RBs planificados para los enlaces de acceso. Los esquemas Back_op3 y Back_op4 se han diseñado siguiendo la misma filosofía y aplicando las mismas restricciones, con la única diferencia de que en el esquema Back_op3 se considera un único patrón de celda (pensado para los esquemas FFR_xGrRBs), frente a los tres patrones de celda que se consideran en el esquema Back_op4 (pensado para los esquemas SFR_xGrRBs). En ambos esquemas se están asignando 2 GrRBs a los enlaces backhaul de cada RN, frente al esquema Back_op2 en el que se asigna un único GrRB. Para incrementar el segundo grupo en el enlace backhaul de cada RN se ha incrementado el reuso frecuencial, con el objetivo de no reducir los recursos frecuenciales disponibles para los enlaces directos. De tal forma que, para seleccionar el primer grupo se planifican 3 GrRBs que son utilizados por dos enlaces backhaul opuestos. Y para añadir el segundo GrRB al enlace backhaul de cada RN se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto.

Esquema	RBs A/B	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
		mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
SFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 6	5.55	6.31	3.52	8.51	15.38 (44.4%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 6	5.60	6.32	3.47	8.51	15.39 (44.5%)
SFR_2GrRBs - Back_op5	6 / 6	5.48	6.36	4.87	5.86	16.21* (52.2%)

Tabla 4.7: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas Back_op3, Back_op4 y Back_op5 (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$) (* limitado por enlace backhaul)

Se puede observar en la Tabla 4.7 que las prestaciones de los esquemas Back_op3 y Back_op4 son muy similares, al haber aplicado para su diseño las mismas restricciones. Si se compara el throughput obtenido por los enlaces backhaul en los esquemas Back_op3 y Back_op4, con el throughput obtenido en el esquema Back_op2 (Tabla 4.5), puede verse que se ha duplicado al duplicar los recursos frecuenciales disponibles. La antena que utilizan los RNs para comunicarse con su DeNB es una antena directiva, que permite reducir fuertemente la interferencia proveniente de los DeNBs adyacentes. Por lo tanto, el principal factor que hay que tener en consideración para garantizar buenas condiciones de interferencia para los enlaces backhaul es el esquema de RA del propio DeNB, para controlar la interferencia intra-celular. En los esquemas Back_op3 y Back_op4 se ha continuado con la filosofía del esquema Back_op2, de tal forma que los RBs que son asignados al enlace backhaul de un RN, solo pueden ser reutilizados por su sector opuesto. Esto permite incrementar el reuso frecuencial del sistema, sin degradar las prestaciones de los enlaces backhaul. No obstante, son los enlaces directos los que ven degradadas sus prestaciones en los esquemas Back_op3 y Back_op4, al incrementarse la interferencia recibida por los mUEs, tanto del propio DeNB, ya que los GrRBs asignados a los enlaces

directos son ahora reutilizados por otro sector para asignar enlaces backhaul, como de los DeNBs adyacentes. Si por ejemplo se toma como referencia el throughput agregado de los mUEs para ambos tipos de subtramas obtenido por el esquema SFR_bm_op2-Back_op2 (9.65 Mbps), puede verse la reducción de este throughput agregado debida al incremento del reuso frecuencial propuesto en los esquemas Back_op3 y Back_op4 (SFR_2GrRBs-Back_op3 y SFR_2GrRBs-Back_op4: 9.07 Mbps).

En el esquema Back_op5 se da un paso más, y se aumenta el reuso frecuencial, permitiendo que en cada DeNB 6 GrRBs sean asignados por los tres sectores de la celda. Estos 6 GrRBs son asignados a enlaces backhaul opuestos en dos sectores, y además el sector restante puede asignarlos a sus enlaces directos. Los 3 GrRBs restantes se utilizan únicamente una vez en el DeNB, con el objetivo de proporcionar RBs con niveles de interferencia más bajos a los mUEs que observan malas condiciones de canal. Como puede verse en la Tabla 4.7 este agresivo reuso frecuencial permite incrementar el throughput agregado de los mUEs (10.35 Mbps), pero a costa de degradar significativamente las prestaciones de los enlaces backhaul. De hecho, la capacidad de los enlaces backhaul no es suficiente para satisfacer el throughput agregado de los rUEs, limitando el throughput global del sistema (estas situaciones se remarcan en los resultados añadiendo un “*” en el throughput global). Respecto a los enlaces directos, los 6 GrRBs que son reutilizados por los tres sectores del DeNB sufren niveles de interferencia muy fuertes, pero finalmente el throughput agregado de los mUEs es superior al de los esquemas Back_op3 y Back_op4, gracias a la mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos que proporciona el esquema Back_op5. La degradación en las prestaciones de los enlaces backhaul se debe a que en el esquema Back_op5 los RBs planificados para los enlaces backhaul son asignados en los tres sectores del DeNB, generando una interferencia intra-celular excesiva, a diferencia de los esquemas Back_op3 y Back_op4, donde los RBs planificados para los enlaces backhaul solo son reutilizados por el enlace backhaul opuesto. Limitando el throughput agregado de los rUEs a la capacidad obtenida por el enlace backhaul (ecuación (4.7)), el esquema Back_op5 es el que proporciona un throughput global más alto (16.21 Mbps). Sin embargo, es a costa de degradar las prestaciones de los rUEs, y además, este esquema no proporciona margen en los enlaces backhaul para continuar incrementando los recursos disponibles para los enlaces de acceso de los RNs. Por lo tanto, el esquema Back_op5 no se considera en el análisis de los siguientes esquemas de ICIC, donde se busca incrementar todavía más el reuso frecuencial, aumentando los recursos planificados para los enlaces de acceso.

En la Tabla 4.7 puede observarse que asignando 6 RBs a los enlaces backhaul de cada RN en los esquemas Back_op3 y Back_op4 se obtiene un gran margen en la capacidad de los enlaces backhaul, frente al throughput agregado

de los rUEs alcanzado por el esquema SFR_2GrRBs. Por lo tanto, se pueden reducir los recursos frecuenciales asignados a los enlaces backhaul, con el objetivo de ajustar mejor la capacidad de los enlaces backhaul al throughput agregado de los rUEs. Se eliminan RBs de los GrRBs reservados para los enlaces backhaul, y esos RBs son devueltos a los enlaces directos del sector correspondiente. Si se toma como ejemplo la celda 1 del esquema Back_op4 (Figura 4.19(a)), los grupos reservados para los enlaces backhaul son los grupos A3, B3 y C3. Por lo tanto, se eliminan RBs de estos tres grupos de la planificación de recursos de los enlaces backhaul, y esos RBs son devueltos a los recursos prioritarios de los sectores correspondientes. Es decir, los RBs que se quiten del grupo A3 de los enlaces backhaul del RN0 y del RN3, serán añadidos a los recursos prioritarios de los enlaces directos del sector A, los del grupo B3 serán añadidos al sector B, y los del grupo C3 serán añadidos al sector C. De esta forma se ajusta la capacidad de los enlaces backhaul, y se aumenta la disponibilidad de recursos para los enlaces directos, para mejorar la eficiencia del sistema.

En la Tabla 4.8 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para el esquema SFR_2GrRBs (Figura 4.18) y FFR_2GrRBs (Figura 4.16), ajustando los RBs planificados para las subtramas backhaul. Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. Una diferencia entre los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs que hay que tener en cuenta es la máscara de potencia aplicada a las diferentes subbandas del sistema. En el esquema FFR_2GrRBs se considera de forma explícita una subbanda exterior de recursos, en la que los DeNBs transmiten con una mayor potencia de acuerdo con la ecuación (4.1). Mientras que en el esquema SFR_2GrRBs, los DeNBs asignan el mismo nivel de potencia transmitida (NPT) a todos los RBs del sistema, con el objetivo de facilitar las expansiones de los enlaces de acceso de los RNs, y garantizar condiciones homogéneas de interferencia para todos los RNs, en los esquemas de ICIC que se han propuesto en este apartado. Con el objetivo de poder evaluar el impacto de esta decisión, en la Tabla 4.8 se han incluido los resultados obtenidos por el esquema SFR_2GrRBs cuando se aplican dos niveles de potencia transmitida (2 NPTs). En este caso, los DeNBs transmiten con potencia superior en la subbanda exterior, y un mayor número de UEs permanecen conectados a los DeNBs. En la mayoría de casos, esos mUEs adicionales son UEs que se encuentran alejados de su DeNB, y por lo tanto, más vulnerables a la interferencia, teniendo que usar MCSs bajos. Por ello, el throughput agregado de los mUEs cuando se aplican 2 NPTs al esquema SFR_2GrRBs se ve reducido. Desde el punto de vista de los rUEs, el throughput agregado es bastante similar en ambos casos, ya que, aunque se incremente la interferencia cross-layer que reciben los rUEs al transmitir el DeNB con mayor potencia en la subbanda exterior, un menor número de UEs

permanecen conectados a los RNs, y son precisamente los UEs más alejados de los RNs los que han pasado a conectarse a los DeNBs cuando se aplican 2 NPTs.

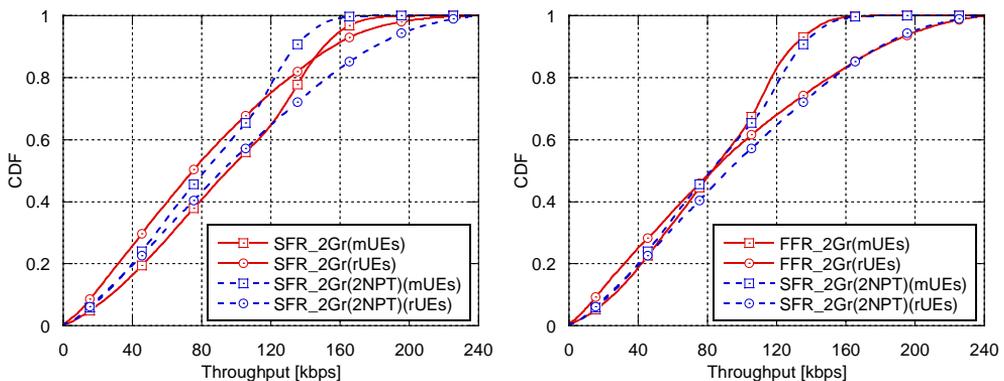
Esquema	RBs A/B	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
		mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 5	5.38	5.80	4.13	7.09	15.31 (43.8%)
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	5.39	5.76	4.70	5.67	15.76* (48.0%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 5	5.60	6.29	4.12	7.09	16.00 (50.2%)
SFR_2GrRBs (2 NPTs) - Back_op4	6 / 5	5.50	6.24	4.03	7.09	15.77 (48.1%)

Tabla 4.8: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas SFR_2GrRBs y FFR_2GrRBs (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$) (* limitado por enlace backhaul)

Estos efectos pueden verse claramente en la Figura 4.26(a), donde se representa la CDF del throughput recibido por los UEs cuando se emplea el esquema SFR_2GrRBs convencional, frente a la alternativa de aplicar 2 NPTs. En ambos casos se emplea el esquema Back_op4, limitando a cinco los RBs planificados para los enlaces backhaul de cada RN. Puede verse que la CDF del throughput recibido por los mUEs es peor cuando se aplican 2 NPTs, debido a los mUEs exteriores adicionales que se conectan a los DeNBs y debido también a que un mayor número de UEs se conectan a los DeNBs, reduciéndose el throughput recibido de forma individual por cada mUE. Respecto a los rUEs, el throughput agregado es similar en ambos casos como se ve en la Tabla 4.8, pero cuando se aplican 2 NPTs un menor número de UEs se conectan a los RNs, y por lo tanto, cada rUE recibe un throughput más alto. La decisión de aplicar un único NPT en el esquema SFR_2GrRBs persigue facilitar las ampliaciones de los enlaces de acceso propuestas en los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs, pero además los resultados muestran que el throughput global del sistema se ve reducido al aplicar 2 NPTs, principalmente por los mUEs adicionales que permanecen conectados a los DeNBs desde las zonas exteriores de la celda. Favoreciendo que estos UEs se conecten a los RNs las prestaciones del sistema son mejores, aprovechando en mayor medida las ventajas de los despliegues RNs.

A continuación, nos centramos en analizar las diferencias entre los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs, cuando en ambos casos se ajustan los recursos de los enlaces backhaul a 5 RBs por RN. En la Tabla 4.8 puede observarse que el esquema SFR_2GrRBs proporciona un mayor throughput agregado para los rUEs. En el esquema FFR_2GrRBs, como solo se considera un patrón de celda en la asignación de recursos, y los RNs utilizan los recursos planificados para los otros sectores de sus propios DeNBs, los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes provocan fuertes niveles de interferencia sobre esos recursos

que reutilizan los RNs. Mientras que el objetivo detrás del diseño del esquema SFR_2GrRBs es modificar los recursos que se planifican para cada sector en las diferentes celdas, definiendo tres patrones de celda diferentes, para de esta forma poder proporcionar a los enlaces de acceso de los relays recursos frecuenciales en los que la interferencia que se recibe de los DeNBs adyacentes es más débil. Por ello, gracias a que en el esquema SFR_2GrRBs se planifican para los enlaces de acceso los RBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes, se consigue minimizar la interferencia cross-layer y mejorar las prestaciones de los rUEs. La interferencia co-layer es similar en ambos esquemas, ya que en los dos casos se ha tratado de asignar diferentes RBs a RNs vecinos.



a) SFR_2GrRBs-Back_op4(5 RBs) vs. SFR_2GrRBs(2 NPTs)-Back_op4(5 RBs) b) FFR_2GrRBs-Back_op3(5 RBs) vs. SFR_2GrRBs(2 NPTs)-Back_op4(5 RBs)

Figura 4.26: CDF del throughput recibido por los mUEs y rUEs (esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs)

Sin embargo, la desventaja de definir tres patrones de celda diferentes como en el esquema SFR_2GrRBs es que la ICIC que sufren los mUEs es más elevada, ya que algunos de los GrRBs planificados para los enlaces directos de un sector son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Mientras que, cuando se define un único patrón de celda como en el esquema FFR_2GrRBs, los GrRBs planificados como recursos prioritarios de un sector para sus enlaces directos no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Las condiciones de interferencia de los mUEs en las subtramas backhaul son similares en ambos casos, ya que se están empleando los esquemas Back_op3 y Back_op4 respectivamente. En la Tabla 4.8 puede verse como a pesar de que el esquema SFR_2GrRBs empeora las condiciones de interferencia de los mUEs, el throughput agregado de los mUEs en las subtramas de acceso es ligeramente superior que cuando se emplea el esquema FFR_2GrRBs. Se puede comparar el esquema FFR_2GrRBs, con la alternativa del esquema SFR_2GrRBs en la que

se aplican 2 NPTs. De esta forma, como se aplican los mismos niveles de potencia en las señales de referencia en ambos casos, se consigue una distribución similar de mUEs y rUEs, y se pueden aislar mejor las diferencias propias de los dos esquemas de RA. El throughput agregado de los mUEs en las subtramas de acceso para el esquema FFR_2GrRBs es de 5.38 Mbps, frente a los 5.50 Mbps alcanzados para el esquema SFR_2GrRBs (2 NPTs). Esto es debido a que el scheduler temporal asigna más prioridad a los mUEs de la zona 0 en las subtramas de acceso cuando se emplea el esquema SFR_2GrRBs, ya que estos mUEs observan buenas condiciones de canal y pueden recibir MCSs más elevados. Por otro lado, en las subtramas backhaul los mUEs de las zonas más exteriores de la celda (zonas 1 y 2) reciben más asignaciones cuando se emplea el esquema SFR_2GrRBs, reduciendo el throughput agregado de los mUEs en este tipo de subtrama (4.03 Mbps frente a 4.13 Mbps). Esta situación es similar a la analizada entre los esquemas SFR_bm_op1-Back_op2 y PF4-Back_op2 en el subapartado 4.3.3.3.

Las diferencias entre los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs pueden verse en más detalle en la Figura 4.26(b), donde se compara la CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema FFR_2GrRBs frente al esquema SFR_2GrRBs aplicando 2 NPTs. En ambos casos se han reducido a 5 RBs los recursos asignados a cada enlace backhaul. Puede observarse como efectivamente se ha mejorado la CDF del throughput de los rUEs con el esquema SFR_2GrRBs, gracias a que se proporcionan a los enlaces de acceso RBs que no son potencialmente asignados por los principales sectores interferentes de los DeNBs adyacentes. Respecto a los mUEs, el esquema SFR_2GrRBs conlleva un incremento en la ICI sufrida por los enlaces directos, de tal forma que, considerando ambos tipos de subtramas, los mUEs de la zona 0 reciben más asignaciones de RBs que en el caso del esquema FFR_2GrRBs. Puede verse en la Figura 4.26(b) como con el esquema SFR_2GrRBs se empeoran ligeramente las prestaciones de los UEs que reciben throughput bajo, debido a que los mUEs de las zonas 1 y 2 reciben menos asignaciones de RBs, mientras que se mejoran las prestaciones de los UEs que reciben throughput alto, gracias a que los mUEs de la zona 0 reciben más asignaciones de RBs.

Como en el caso del esquema FFR_2GrRBs el throughput agregado de los rUEs es menor, se puede tratar de reducir la capacidad de los enlaces backhaul, para ajustarla mejor al throughput alcanzado por los rUEs. Por ello, en la Tabla 4.8 también se incluyen los resultados obtenidos por el esquema FFR_2GrRBs, cuando se reducen a 4 RBs los recursos planificados para los enlaces backhaul de cada RN. Aunque la capacidad del enlace backhaul es ligeramente inferior que el throughput agregado de los rUEs, se incrementa el throughput global del sistema. Esto es gracias a que los RBs que se eliminan de los enlaces backhaul se añaden a los recursos planificados para los enlaces directos, aumentando los

recursos disponibles y, por lo tanto, incrementando el throughput agregado de los mUEs. De todas formas, el throughput global alcanzado sigue siendo inferior al proporcionado por el esquema SFR_2GrRBs. Por lo tanto, se puede concluir que el esquema SFR_2GrRBs supera las prestaciones globales del esquema FFR_2GrRBs, gracias a planificar para los enlaces de acceso recursos frecuenciales en los que la interferencia cross-layer es más leve. Además, en la Figura 4.27 puede verse que la CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas FFR_2GrRBs-Back_op3(4 RBs) y SFR_2GrRBs-Back_op4(5 RBs) es similar, aunque el esquema SFR_2GrRBs mejora las prestaciones de los UEs que reciben throughput medio, a costa de empeorar ligeramente las prestaciones de los UEs que reciben throughput alto, obteniendo una distribución del throughput un poco más equitativa.

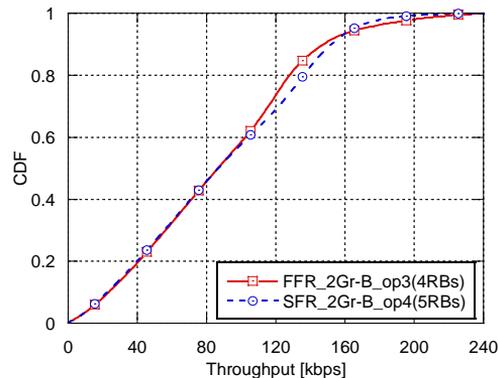


Figura 4.27: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas FFR_2GrRBs-Back_op3(4 RBs) y SFR_2GrRBs-Back_op4(5 RBs))

Si se comparan los resultados obtenidos por los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs, con los resultados obtenidos por los esquemas de ICIC preliminares, puede observarse que al incrementar el reuso frecuencial aumentando los recursos planificados para los enlaces de acceso y los enlaces backhaul, se ha conseguido incrementar el throughput agregado de los rUEs, sin degradar las prestaciones de los mUEs. Por lo tanto, gracias a que estos esquemas de ICIC se han diseñado teniendo en cuenta la interferencia generada entre los diferentes nodos y enlaces, se ha conseguido mejorar las prestaciones globales del sistema, al incrementar la eficiencia espectral. Si en primer lugar nos centramos en los enlaces de acceso, se ha obtenido un gran incremento en el throughput agregado de los rUEs gracias a haber duplicado los RBs disponibles en cada RN. Aunque se han duplicado los RBs, el throughput alcanzado por los rUEs no es el doble. Una de las razones de ello es que la potencia de transmisión por RB en los RNs es más baja al tener un mayor número de RBs asignables, y los rUEs están menos protegidos frente a la interferencia. Otra razón es que, al incrementar el reuso frecuencial, RNs que se encuentran adyacentes tienen que

reutilizar los mismos recursos frecuenciales, incrementando la interferencia co-layer. Respecto a los enlaces backhaul, ya se han analizado en detalle las prestaciones de los esquemas Back_op3 y Back_op4 que permiten duplicar la capacidad. Sin embargo, los enlaces directos ven degradadas sus prestaciones, al incrementarse el reuso frecuencial en las subtramas backhaul. No obstante, reduciendo los recursos frecuenciales planificados para los enlaces backhaul, para ajustar su capacidad al throughput agregado de los rUEs, se puede compensar este incremento de los niveles interferentes gracias a una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. De esta forma, el throughput agregado de los mUEs cuando se reducen a 5 RBs los recursos planificados a cada enlace backhaul en los esquemas Back_op3 y Back_op4 es similar al alcanzado cuando se emplea el esquema Back_op2: 9.65 Mbps para el esquema SFR_bm_op2-Back_op2(3RBs), frente a 9.72 Mbps para el esquema SFR_2GrRBs-Back_op4(5RBs).

En todos los esquemas de RA que se han analizado, la potencia de transmisión por RB es fija, y para cada uno de los esquemas se calcula mediante las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3). En este capítulo el modelo de tráfico empleado es full-buffer, por lo que los esquemas de RA que proporcionan un throughput global más elevado obtienen una mejor eficiencia energética, ya que son capaces de transmitir una mayor tasa de datos a los usuarios consumiendo la misma energía. De forma similar, en escenarios en los que se aplican otros modelos de tráfico, los esquemas de RA que son capaces de satisfacer los requisitos de tasa de datos de los usuarios, pero empleando un menor porcentaje de su RBs disponibles, son más eficientes ya que consumen menos energía.

4.4.7.2 Definición de recursos prioritarios para los sectores

Con el objetivo de coordinar los recursos que se planifican para los RNs, con aquellos que son usados por los DeNBs, en los esquemas de ICIC que se han propuesto se han definido recursos prioritarios para cada sector, tal y como se muestra por ejemplo en la Figura 4.12. La alternativa sería que todos los recursos frecuenciales de la subbanda interior tuvieran la misma prioridad en los tres sectores. Los resultados incluidos en la Tabla 4.9 persiguen comparar las prestaciones obtenidas por los esquemas ya revisados, en los que se considera la ordenación en la asignación de recursos, frente a la alternativa de no definir recursos prioritarios. En concreto se han escogido los esquemas SFR_bm_op2 (Figura 4.11(b)) y FFR_2GrRBs (Figura 4.16). Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. Las prestaciones de los mUEs se ven ligeramente degradadas cuando no se definen recursos prioritarios, debido al incremento de las fluctuaciones de la ICI, ya que la ICI varía con las reasignaciones de recursos entre los diferentes sectores de los

DeNBs adyacentes. Al no definir recursos prioritarios, la interferencia puede venir de cualquier sector de los DeNBs adyacentes y, además, el sector origen puede variar en cada subtrama. No obstante, las diferencias en el throughput agregado de los mUEs no son muy significativas, debido a que se está considerando un modelo de tráfico full-buffer. En un escenario con servicios más realistas, y en particular, con servicios con restricciones de retardo, las diferencias serían mucho más pronunciadas.

Esquema	RBs A/B	mUEs	rUEs	Backhaul	Global [Mbps]
SFR_bm_op2 - Back_op2	3 / 3	9.65	3.66	4.26	13.31 (25.0%)
SFR_bm_op2 - Back_op2 (sin definir RBs prioritarios)	3 / 3	9.55	3.50	4.26	13.05 (22.5%)
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	10.09	5.76	5.67	15.76* (48.0%)
FFR_2GrRBs - Back_op3 (sin definir RBs prioritarios)	6 / 4	9.92	5.44	5.12	15.04* (41.2%)

Tabla 4.9: Prestaciones de la definición de recursos prioritarios entre sectores [Mbps] (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$) (*limitado por enlace backhaul)

Desde el punto de vista de los enlaces de acceso, cuando no se definen recursos prioritarios y el propio sector que da servicio al RN utiliza para sus enlaces directos los mismos recursos frecuenciales que usa el RN para sus enlaces de acceso, la interferencia recibida por los rUEs es más fuerte, degradando los valores de SINR, y reduciendo el throughput agregado de los rUEs. Finalmente, en la Tabla 4.9 también se puede ver como las prestaciones de los enlaces backhaul se degradan cuando no se definen recursos prioritarios en el esquema Back_op3. Esta degradación se produce cuando el sector adyacente del propio DeNB que da servicio al RN asigna a sus enlaces directos los mismos RBs asignados al enlace backhaul del RN, incrementándose la interferencia intra-celular. Como en el esquema Back_op2 se reservan unos recursos frecuenciales de forma exclusiva para los enlaces backhaul, las asignaciones del DeNB a sus enlaces directos no generan interferencia sobre los enlaces backhaul y, por lo tanto, no se ven afectados por la definición o no de recursos prioritarios. Por lo tanto, podemos concluir que definir recursos prioritarios para cada sector es una estrategia adecuada, que permite coordinar de una manera más eficiente los recursos que son asignados a cada tipo de enlace, mejorando las prestaciones de la red.

4.4.7.3 Aplicación de un bias al criterio de selección de nodo

En la Tabla 4.10 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos basados en FFR (FFR_xGrRBs), para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. Como se

impone que un UE solo pueda recibir como máximo un RB en cada subtrama para evitar la monopolización de recursos por parte de los UEs que observan buenas condiciones de canal, algunos RBs podrían quedarse sin asignar, si ocasionalmente no hay suficientes UEs que satisfagan los requisitos de SINR para al menos recibir el MCS más bajo. Esta situación comienza a darse para los enlaces de acceso cuando se incrementan a 9RBs los recursos asignados a cada RN, y se hace especialmente relevante cuando los recursos disponibles para los enlaces de acceso de cada RN se incrementan a 12 RBs. Hay que tener en cuenta que, cuando se incrementan los RBs que un RN tiene disponibles para asignar sus enlaces de acceso, se ha considerado que la potencia de transmisión por RB sea más baja, y menos UEs permanecen conectados a los RNS, y los UEs que se conectan a los RNs están menos protegidos frente a la interferencia. Además, como se incrementa el reuso frecuencial entre RNs vecinos, los rUEs reciben un mayor nivel de interferencia co-layer. Por lo tanto, cuando se incrementan los RBs disponibles para los enlaces de acceso, un menor número de UEs se conectan a los RNs y además esos rUEs ven degradados sus niveles de SINR, provocando que parte de los RBs disponibles para los enlaces de acceso se queden sin asignar. Ya se ha visto que una estrategia ampliamente extendida para incrementar el número de UEs que se conectan a los nodos de baja potencia es el criterio CRE, considerándose también una estrategia válida en los despliegues de RNs [46]. Por ello, con el objetivo de aprovechar esos RBs que se quedan sin asignar, se añade un bias positivo al nivel de RSRP de los RNs. Por lo tanto, un UE se conecta a un RN si al añadir el bias a la RSRP del RN se obtiene un valor superior a la RSRP del DeNB, tal y como se expresa en la ecuación (4.8). De esta forma, se amplía el área de cobertura de los RNs y se incrementa el número de UEs que se conectan a los RNs, incrementándose el número de UEs que pueden beneficiarse de las ventajas que proporciona el despliegue de RNs. Aunque la limitación de asignar como máximo un RB en cada subtrama a un UE pueda parecer extraña en un escenario con modelo de tráfico full-buffer, esta situación puede darse en escenarios con tráfico real.

$$(RSRP_{RN})_{dB} + (bias)_{dB} > (RSRP_{DeNB})_{dB} \quad (4.8)$$

En la Tabla 4.10 se muestra el throughput promedio obtenido para los esquemas FFR_xGrRBs, cuando no se aplica bias en el criterio de selección de nodo (0 dB), frente a aplicar un bias de 2 dB y de 4dB. Cuando se aplica el bias al criterio de selección de nodo, una porción de los mUEs, principalmente de las zonas 1 y 2, pasa a conectarse a los RNs. Por lo tanto, como ahora un menor número de UEs de las zonas 1 y 2 se conectan a los DeNBs, los mUEs de la zona 0 reciben un mayor porcentaje de RBs, pudiendo utilizar MCSs más elevados gracias a que observan mejores condiciones de canal. Por ello se incrementa el throughput agregado de los mUEs cuando se aplica un bias al criterio de

selección de nodo. En la Figura 4.28(a) se puede ver como la CDF del throughput recibido por los mUEs para el esquema FFR_3GrRBs mejora a medida que se incrementa el bias, principalmente debido a que un menor número de UEs se conecta a los DeNBs, y por lo tanto, el throughput recibido de forma individual por cada mUE es mayor.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	0	5.39	5.76	4.70	5.67	15.76* (48.0%)
	6 / 4	2	5.47	5.80	4.78	5.67	15.92* (49.5%)
	6 / 4	4	5.56	5.74	4.87	5.67	16.10* (51.2%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 5	0	5.30	6.57	4.06	7.09	15.93 (49.6%)
	9 / 5	2	5.37	6.75	4.14	7.09	16.26 (52.7%)
	9 / 5	4	5.45	6.92	4.21	7.09	16.58 (55.7%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 5	0	5.25	6.28	4.06	7.09	15.59 (46.4%)
	12 / 5	2	5.31	6.54	4.12	7.09	15.97 (50.0%)
	12 / 5	4	5.40	6.80	4.16	7.09	16.36 (53.6%)

Tabla 4.10: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR para diferentes valores de bias (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$) (* limitado por enlace backhaul)

Cuando se planifican 9 y 12 RBs para los enlaces de acceso de cada RN, se incrementa el throughput agregado de los rUEs al añadir el bias al criterio de selección de nodo, ya que los UEs adicionales que se conectan a los RNs aprovechan los RBs que se quedaban sin asignar. Por lo tanto, aunque los UEs adicionales que se conectan a los RNs al aplicar el bias se encuentran alejados de los RNs, observando peores condiciones de canal y recibiendo MCSs más bajos, el throughput agregado de los rUEs se incrementa gracias a que la ocupación de RBs es mayor. Sin embargo, cuando solo se planifican 6 RBs para los enlaces de acceso, aunque no se aplique un bias, los RNs asignan todos sus RBs disponibles en la mayoría de subtramas. Por lo tanto, la ganancia obtenida al aprovechar los RBs que se quedaban sin asignar es menor. Además, como los rUEs adicionales observan peores condiciones de canal, y reciben MCSs más bajos, se contrarresta esta ganancia, obteniendo un throughput agregado de los rUEs muy similar en los tres casos. En la Figura 4.28(a) se puede observar que la CDF del throughput recibido por los rUEs para el esquema FFR_3GrRBs empeora a medida que se incrementa el bias, debido a que los nuevos rUEs que se conectan gracias al bias emplean MCSs más bajos, y debido también a que, al incrementarse el número de UEs conectados a los RNs, el throughput recibido por cada rUE es menor, al recibir menos asignaciones de RBs.

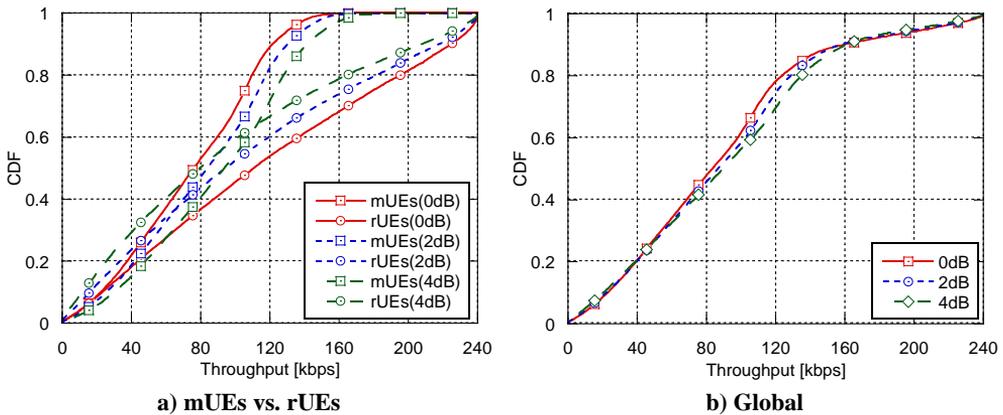


Figura 4.28: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema FFR_3GrRBs-Back_op3(5 RBs) cuando se aplica un bias al criterio de selección de nodo

Se puede concluir que la aplicación de un bias al criterio de selección de nodo permite incrementar el throughput global del sistema, gracias a mejorar el aprovechamiento de los RBs disponibles para los enlaces de acceso de los RNs y, en definitiva, gracias a potenciar que un mayor número de UEs se vean beneficiados de las ventajas que proporciona el despliegue de RNs. Esta ganancia es mayor a medida que se incrementan los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso, ya que esto conlleva que un mayor número de RBs se queden sin asignar si no se aplica bias y, por lo tanto, los rUEs adicionales que se conectan al aplicar el bias disponen de una mayor cantidad de RBs libres, obteniendo una mayor mejora del throughput global. En la Figura 4.28(b) se representa la CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema FFR_3GrRBs, sin diferenciar entre rUEs y mUEs. Se puede observar que la aplicación del bias, además de incrementar el throughput global, también permite mejorar ligeramente la CDF del throughput de los UEs. Aunque los efectos de aplicar un bias al criterio de selección de nodo se han analizado para el esquema FFR_xGrRBs, para el esquema SFR_xGrRBs se obtienen las mismas conclusiones, y no se han añadido los resultados obtenidos con el esquema SFR_xGrRBs para los diferentes valores de bias por sencillez y por no extender en exceso el análisis.

4.4.7.4 Comparativa de los esquemas basados en FFR y SFR

Una vez que se ha visto que la aplicación de un bias al criterio de selección de nodo mejora el throughput global de la red, especialmente cuando se incrementan los recursos asignados a los enlaces de acceso a 9 y 12 RBs, en la Tabla 4.11 se compara el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos basados en FFR y SFR (FFR_xGrRBs y

SFR_xGrRBs), para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$, y aplicándose un bias de 4 dB. Si en primer lugar se analizan los efectos de aumentar la cantidad de RBs asignados a los enlaces de acceso, puede observarse que en general el throughput agregado de los rUEs se ve incrementado. Cuando se incrementa de 6 a 9 RBs, el throughput agregado de los rUEs mejora notablemente, aunque la ganancia es menor que cuando se incrementa de 3 a 6 RBs. Como ya se ha comentado antes, cuando se aumentan los recursos disponibles para los enlaces de acceso, la potencia de transmisión por RB de los RNs es más baja y, por lo tanto, los rUEs son más vulnerables a la interferencia. Además, como se incrementa el reuso frecuencial entre RNs vecinos, los rUEs reciben un mayor nivel de interferencia co-layer. Por lo tanto, los rUEs observan peores niveles de SINR, y reciben asignaciones con MCSs más bajos, obteniéndose una ganancia más baja cuando se aumenta de 6 a 9 RBs, que cuando se aumenta de 3 a 6 RBs. Si se da un paso más, y se aumentan a 12 RBs los recursos disponibles para los enlaces de acceso, puede verse como la ganancia en el throughput agregado de los rUEs es bastante limitada para el esquema SFR_4GrRBs, mientras que para el esquema FFR_4GrRBs, incluso se degradan las prestaciones de los rUEs. Por lo tanto, al incrementar a 12 RBs los recursos asignados a los enlaces de acceso, los valores de SINR observados por los rUEs se degradan en exceso, y la ganancia obtenida gracias a la mayor disponibilidad de recursos es similar o incluso inferior a la degradación de prestaciones sufrida por los rUEs.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	5.56	5.74	4.87	5.67	16.10* (51.2%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 5	4	5.45	6.92	4.21	7.09	16.58 (55.7%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 5	4	5.40	6.80	4.16	7.09	16.36 (53.6%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 5	4	5.79	6.13	4.27	7.09	16.19 (52.0%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 6	4	5.67	8.08	3.51	8.51	17.26 (62.1%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 6	4	5.65	8.30	3.46	8.51	17.41 (63.5%)

Tabla 4.11: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$) (* limitado por enlace backhaul)

Respecto a los enlaces directos, cuando se incrementa la cantidad de RBs asignados a los enlaces de acceso, el throughput agregado de los mUEs se ve reducido. Hay que tener en cuenta que, a medida que se aumentan los recursos asignados a los enlaces de acceso, la potencia transmitida por RB por los RNs es más baja y, por lo tanto, un mayor número de UEs se conectan a los DeNBs. La mayor parte de estos mUEs adicionales pertenecen a las zonas exteriores de los DeNBs, por lo tanto, un mayor porcentaje de los RBs disponibles son asignados

a mUEs de las zonas 1 y 2, usando MCSs más bajos. Esto conlleva una ligera reducción del throughput agregado de los mUEs. Adicionalmente, lo que sí que conlleva una reducción más notable del throughput agregado de los mUEs es la reducción de los RBs disponibles para los enlaces directos en las subtramas backhaul, cuando se aumentan los RBs planificados para los enlaces backhaul, para satisfacer el aumento del throughput agregado de los rUEs.

Los resultados muestran que ampliar a 3 GrRBs los recursos planificados para los enlaces de acceso permite incrementar significativamente el throughput global del sistema, especialmente para el caso del esquema basado en SFR (SFR_3GrRBs). A pesar de que es necesario incrementar los RBs planificados para los enlaces backhaul, reduciendo los RBs disponibles para los enlaces directos, la ganancia obtenida por los enlaces de acceso es mayor que la reducción de throughput sufrida por los enlaces directos. Por lo tanto, se ha conseguido mejorar las prestaciones del sistema gracias a incrementar todavía más el reuso frecuencial entre los diferentes nodos y enlaces. Sin embargo, cuando se amplían a 4 GrRBs los recursos asignados a los enlaces de acceso, el reuso frecuencial comienza a ser excesivo, obteniéndose una ganancia limitada para el esquema SFR_4GrRBs, e incluso una degradación de las prestaciones para el esquema FFR_4GrRBs. En la Figura 4.29(a) se representa la CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_xGrRBs, aplicándose un bias de 4dB al criterio de selección de nodo. Puede verse como los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs mejoran la CDF del throughput obtenida por el esquema SFR_2GrRBs, gracias al incremento del reuso frecuencial, que permite aumentar la disponibilidad de recursos para los enlaces de acceso. Los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs obtienen prestaciones similares, mejorando ligeramente el esquema SFR_4GrRBs las prestaciones de los UEs que reciben throughput alto, que se corresponden con los rUEs que observan buenas condiciones de canal. Hay que tener en cuenta que en el esquema SFR_4GrRBs hay una mayor disponibilidad de RBs para los enlaces de acceso y, además, menos UEs se conectan a los RNs, por lo que estos rUEs son capaces de recibir un throughput más elevado.

En la Tabla 4.11 puede volverse a ver que los esquemas basados en SFR proporcionan un mayor throughput global que los esquemas basados en FFR, gracias a que se planifican para los enlaces de acceso los RBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Esta estrategia permite minimizar la interferencia cross-layer recibida por los enlaces de acceso, mejorando las prestaciones de los rUEs. El throughput agregado de los mUEs es más bajo cuando se emplean los esquemas basados en SFR, debido principalmente a que es necesario planificar más recursos frecuenciales para los enlaces backhaul, para satisfacer el mayor throughput agregado de los rUEs, disminuyendo los RBs disponibles para los

enlaces directos. No obstante, la ganancia obtenida en los enlaces de acceso es mayor que la reducción en los enlaces directos provocada por el incremento de capacidad de los enlaces backhaul. Por lo tanto, se puede concluir que los esquemas basados en SFR superan las prestaciones de los esquemas basados en FFR, gracias a planificar para los enlaces de acceso recursos frecuenciales en los que la interferencia cross-layer es más leve. En la Figura 4.29(b) se representa la CDF del throughput recibido por los UEs para las mejores alternativas de los esquemas basados en FFR y SFR, aplicándose un bias de 4dB al criterio de selección de nodo. El esquema SFR_4GrRBs, además de obtener el mayor throughput global, también permite mejorar la CDF del throughput recibido, respecto al esquema FFR_3GrRBs.

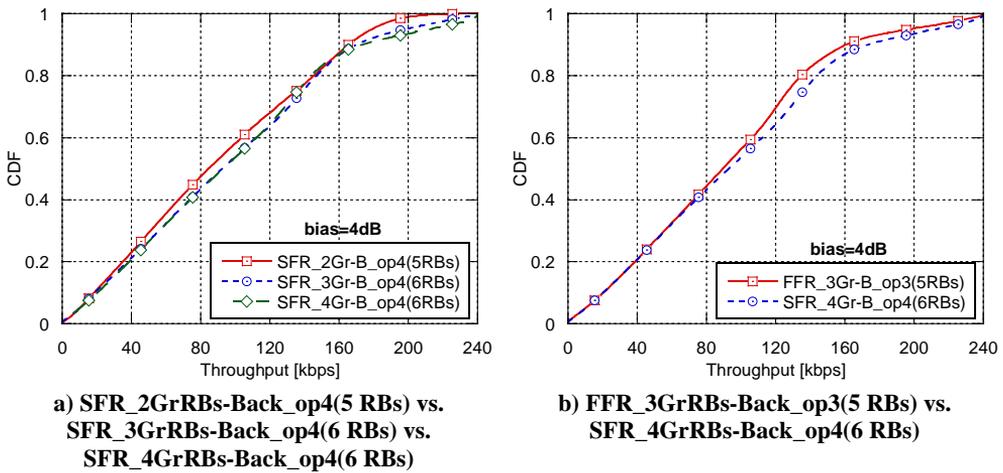


Figura 4.29: CDF del throughput recibido por los UEs (esquemas basados en FFR y SFR, cuando se aplica un bias de 4dB)

4.4.7.5 Impacto de la posición de los relays dentro del DeNB

En los resultados presentados hasta ahora, los RNs son desplegados a una distancia de $2/3$ del radio de la celda respecto al centro de la celda, considerándose un $\theta_0 = 30^\circ$. Esta disposición de los RNs es comúnmente utilizada en la literatura [44][49] con el objetivo de maximizar la capacidad del sistema. No obstante, si los RNs se despliegan a mayor distancia del centro de la celda, un mayor número de UEs de la zona 2 podrían conectarse a los RNs. En general los UEs de la zona 2 no observan buenas condiciones de canal respecto a los DeNBs, debido a que se encuentran bastante alejados. Sin embargo, si se potencia que una mayor parte de los UEs de las zonas más alejadas de la celda se conecten a los RNs, estos UEs podrían beneficiarse de mejores condiciones de canal, gracias a unas menores pérdidas de propagación respecto a los RNs. Con este objetivo, en la Tabla 4.12 se muestra el throughput promedio por celda

(Mbps) para los esquemas basados en FFR y SFR, desplegando los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2. Esta distancia se corresponde aproximadamente con $d \approx 0.76 \cdot R$. Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $\theta_0 = 30^\circ$.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	5.61	5.52	4.85	5.67	15.98 (50.0%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 5	4	5.51	6.69	4.19	7.09	16.39 (53.9%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 5	4	5.46	6.56	4.18	7.09	16.20 (52.1%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 5	4	5.81	5.93	4.29	7.09	16.03 (50.5%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 6	4	5.71	7.81	3.53	8.51	17.05 (60.1%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 6	4	5.67	8.09	3.47	8.51	17.23 (61.8%)

Tabla 4.12: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)

Si se comparan los resultados obtenidos para los esquemas basados en FFR y SFR cuando los RNs se despliegan a $2/3$ del radio de la celda (Tabla 4.11), frente a los obtenidos cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, puede verse que el throughput global del sistema es un poco más bajo cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, debido principalmente a que el throughput agregado de los rUEs es más bajo. Como los RNs son desplegados más lejos del DeNB, y el criterio de selección de nodo está basado en la RSRP, se conectan a los RNs usuarios que se encuentran más alejados de los RNs que les dan servicio. Estos rUEs son más vulnerables a las interferencias, y recibirán sus asignaciones con MCSs más bajos, reduciendo el throughput agregado de los rUEs. Respecto a los enlaces directos, el throughput agregado de los mUEs es muy similar, siendo ligeramente superior cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. Hay que tener en cuenta que cuando los RNs son desplegados más hacia el exterior del DeNB, un menor número de UEs de la zona 2 se conectan a los DeNBs, sin embargo, aumenta el número de UEs de la zona 1 que vuelven a conectarse a los DeNBs. Por ello, el incremento en el throughput agregado de los mUEs obtenido cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 es bastante leve.

Respecto a los enlaces backhaul, se obtienen los mismos resultados independientemente de la distancia a la que se despliegan los RNs. Como los RNs utilizan una antena directiva para conectarse con sus DeNBs, la interferencia proveniente de los DeNBs adyacentes no es un factor limitante, y la interferencia dominante proviene del propio DeNB que da servicio al RN. Por lo tanto, aunque los RNs se hayan desplegado más lejos del DeNB, la señal útil y la señal interferente dominante sufren la misma atenuación adicional, obteniéndose

valores de SINR similares en ambos casos. En la Tabla 4.13 se recoge el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas basados en FFR y SFR, para las dos distancias (d) consideradas, pero desglosando el throughput promedio obtenido para cada una de las zonas del DeNB. Cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, el throughput agregado de los UEs de la zona 2 se incrementa notablemente, gracias a que más UEs de esta zona se conectan a los RNs, y se ven beneficiados de mejores condiciones de canal. El esquema SFR_4GrRBs permite alcanzar una ganancia del 115% en la zona 2, respecto al throughput logrado por la red macrocelular convencional en la misma zona.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Global [Mbps]	Zona 0 [Mbps]	Zona 1 [Mbps]	Zona 2 [Mbps]
Los RNs se despliegan a 2/3 del radio de la celda respecto al DeNB ($d = 2/3 \cdot R$)						
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	16.10 (51.2%)	7.57 (47.6%)	5.46 (68.0%)	3.07 (35.2%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 5	4	16.58 (55.7%)	6.91 (34.7%)	6.32 (94.5%)	3.35 (47.6%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 5	4	16.36 (53.6%)	6.62 (29.0%)	6.39 (96.6%)	3.35 (47.6%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 5	4	16.19 (52.0%)	8.11 (58.1%)	5.10 (56.9%)	2.98 (31.3%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 6	4	17.26 (62.1%)	7.35 (43.3%)	6.45 (98.5%)	3.46 (52.4%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 6	4	17.41 (63.5%)	7.09 (38.2%)	6.73 (107.1%)	3.59 (58.1%)
Los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)						
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	15.98 (50.0%)	7.30 (42.3%)	4.95 (52.3%)	3.73 (64.3%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 5	4	16.39 (53.9%)	6.59 (28.5%)	5.33 (64.0%)	4.47 (96.9%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 5	4	16.20 (52.1%)	6.40 (24.8%)	5.35 (64.6%)	4.45 (96.0%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 5	4	16.03 (50.5%)	7.74 (50.9%)	4.69 (44.3%)	3.60 (58.6%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 6	4	17.05 (60.1%)	6.96 (35.7%)	5.41 (66.5%)	4.68 (106.2%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 6	4	17.23 (61.8%)	6.72 (31.0%)	5.63 (73.2%)	4.88 (115.0%)

Tabla 4.13: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en FFR y SFR (2 RNs por sector y $\theta_0 = 30^\circ$)

Por otro lado, el throughput agregado de los UEs de las zonas 0 y 1 se ve reducido cuando los RNs se despliegan más hacia el exterior de la celda. En ambas zonas, UEs que previamente se conectaban a los RNs pasan a conectarse a los DeNBs, al desplegar los RNs más lejos del centro de la celda. Estos UEs de las zonas 0 y 1, que previamente se conectaban a los RNs, se encontraban ubicados bastante cerca de los RNs (especialmente los UEs de la zona 1) y por lo tanto observaban buenas condiciones de canal, recibiendo un throughput bastante elevado. Ahora se conectan a los DeNBs, y no observan malas condiciones de canal respecto a su DeNB, ya que pertenecen al exterior de la zona 0 y a la zona 1. Sin embargo, sí que cuentan con menos RBs disponibles al conectarse al DeNB, recibiendo menos asignaciones de recursos, y obteniendo

un throughput más bajo, que cuando se conectaban a los RNs. Por lo tanto, el throughput agregado de los rUEs de las zonas 0 y 1 se reduce notablemente, debido principalmente a que menos UEs de ambas zonas se conectan a los RNs, pero también a que, los UEs que se conectan, se encuentran más lejos de los RNs que les dan servicio. Todo ello conlleva que la reducción del throughput agregado de los rUEs de las zonas 0 y 1 cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 es mayor, que el incremento en el throughput agregado de los mUEs de las zonas 0 y 1.

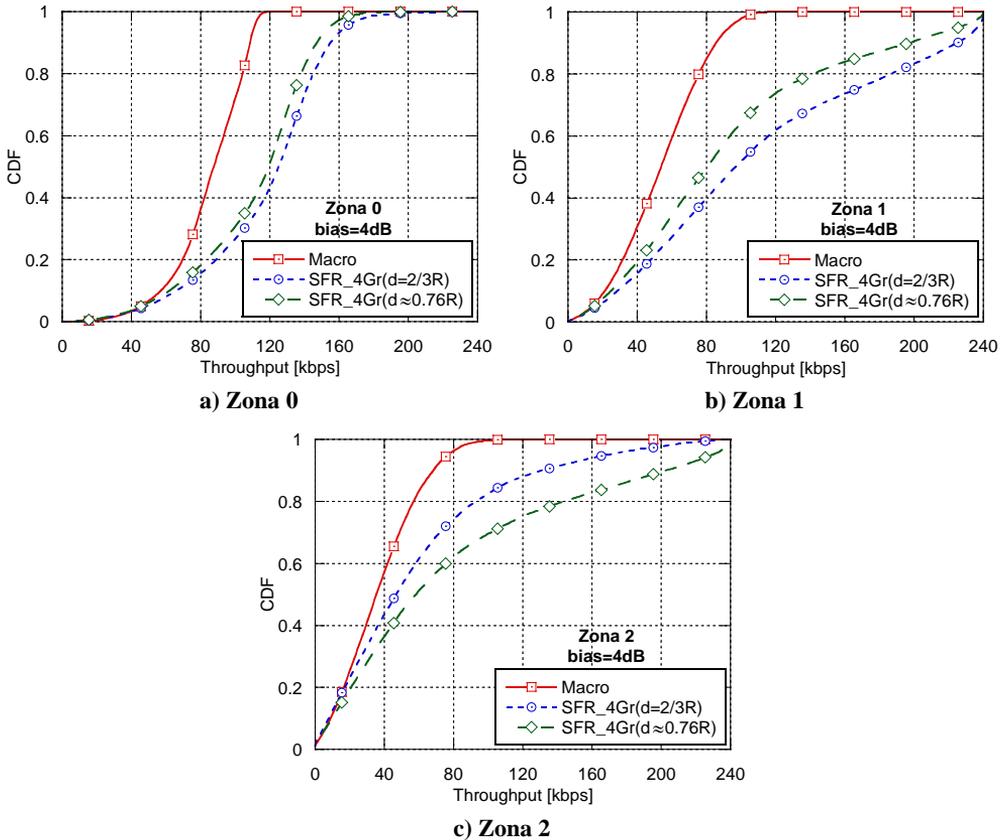


Figura 4.30: CDF del throughput recibido por los UEs para la red macrocelular convencional y para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), desplegando los RNs a $2/3$ del radio de la celda ($d = 2/3 \cdot R$) y en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)

Aunque tal y como se ve en la Tabla 4.13, el throughput global del sistema se reduce cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, se consigue una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de la celda, alcanzándose además un gran incremento para los usuarios del exterior de la celda (zona 2) respecto al escenario macrocelular convencional. En la Figura 4.30 se representa la CDF del throughput recibido

por los UEs de las diferentes zonas de la celda, para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), desplegando los RNs en las dos distancias (d) consideradas y aplicando un bias de 4dB al criterio de selección de nodo. Además, también se representa la CDF del throughput obtenida para el escenario macrocelular convencional a modo de referencia. En primer lugar, puede observarse como el despliegue de RNs permite mejorar las prestaciones en todas las zonas de la celda, gracias especialmente al diseño de un esquema de ICIC que permite coordinar los recursos empleados por los diferentes enlaces, para minimizar la interferencia generada. En segundo lugar, puede verse en más detalle que cuando los RNs son desplegados en la zona exterior de las celdas ($d \approx 0.76 \cdot R$) se mejora notablemente las prestaciones de los UEs exteriores (zona 2), pero a costa de degradar las prestaciones de los usuarios de la zona 0, y especialmente, de la zona 1, ya que cuando los RNs se despliegan a $2/3$ del radio de la celda son precisamente los UEs de la zona 1 los más beneficiados.

4.4.7.6 Esquemas basados en FFR y SFR para la configuración de 4 RNs por sector

Hasta ahora se han analizado los resultados de los esquemas de ICIC y RA propuestos para la configuración de 2 RNs por sector. Sin embargo, el despliegue de un mayor número de RNs en los DeNBs puede incrementar las prestaciones del sistema, gracias a que un mayor número de usuarios podrían beneficiarse de unas mejores condiciones de canal al estar conectados a los RNs. En la Tabla 4.14 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas basados en FFR y SFR para la configuración de 4 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$. Si en primer lugar se comparan las prestaciones de los esquemas basados en FFR frente a los basados en SFR, se obtienen las mismas conclusiones que las vistas para la configuración de 2 RNs por sector (Tabla 4.11). Y es que los esquemas basados en SFR permiten incrementar notablemente el throughput agregado de los rUEs, gracias a que se planifican para los enlaces de acceso de los RNs aquellos GrRBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, minimizando la interferencia cross-layer. Respecto a los enlaces directos, los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs proporcionan un throughput agregado similar, mientras que cuando se incrementan a tres y cuatro los GrRBs asignados a los enlaces de acceso, es necesario incrementar la capacidad de los enlaces backhaul en los esquemas basados en SFR para satisfacer el mayor throughput agregado de los rUEs, reduciendo los RBs disponibles para los enlaces directos y, por lo tanto, reduciendo el throughput agregado de los mUEs. Hay que tener en cuenta que en los esquemas Back_op3 y Back_op4 propuestos para la configuración de 4 RNs por sector (Figura 4.23 y

Figura 4.25 respectivamente) se planifica inicialmente un único GrRB para cada enlace backhaul, por lo que para aumentar su capacidad se asignan a los enlaces backhaul RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector. Finalmente, y a nivel global, los esquemas basados en SFR vuelven a ofrecer mejores prestaciones que los esquemas basados en FFR, gracias a la planificación de recursos frecuenciales en los que la interferencia cross-layer es más leve para los enlaces de acceso.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	5.94	10.33	1.23	11.01	17.50 (64.3%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 4	4	5.86	10.57	1.22	11.01	17.65 (65.7%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 4	4	5.82	9.93	1.22	11.01	16.97 (59.3%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 4	4	6.10	11.13	1.20	11.01	18.31* (71.9%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 4.5	4	5.96	12.42	0	12.39	18.35* (72.3%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 4.5	4	5.94	12.32	0	12.39	18.26 (71.5%)

Tabla 4.14: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$) (* limitado por enlace backhaul)

En la Tabla 4.14 puede verse que al incrementar los RBs planificados para los enlaces de acceso de 2 a 3 GrRBs se mejora notablemente el throughput agregado de los rUEs cuando se emplea el esquema basado en SFR, mientras que la ganancia es bastante más reducida para el esquema basado en FFR. Como se ha visto antes, al aumentar los recursos disponibles para los enlaces de acceso, la potencia de transmisión por RB de los RNs se reduce y, por lo tanto, los rUEs son más vulnerables a la interferencia. Además, como se incrementa el reuso frecuencial entre RNs vecinos, los rUEs reciben un mayor nivel de interferencia co-layer. Por lo tanto, los rUEs observan peores niveles de SINR. Como los esquemas basados en SFR permiten proporcionar a los RNs recursos en los que la interferencia cross-layer y co-layer es menor, los niveles de SINR de los rUEs no se degradan en exceso y se obtiene una ganancia significativa en el throughput agregado de los rUEs, gracias a la mayor disponibilidad de RBs. No obstante, como es necesario incrementar la capacidad de los enlaces backhaul para satisfacer el incremento del throughput agregado de los rUEs, el throughput global de los esquemas SFR_2GrRBs y SFR_3GrRBs es muy similar. Finalmente, cuando se incrementan a 4 GrRBs los recursos asignados a los enlaces de acceso de cada RN, el throughput agregado de los rUEs se ve reducido, tanto para el esquema SFR_4GrRBs como para el esquema FFR_4GrRBs. Por lo tanto, la degradación provocada por el incremento en el reuso frecuencial de los RNs es mayor que la ganancia obtenida por el aumento de la disponibilidad de recursos frecuenciales. La reducción del throughput

agregado de los rUEs es mayor para el esquema FFR_4GrRBs, ya que los rUEs reciben mayores niveles de interferencia que los recibidos cuando se emplea el esquema SFR_4GrRBs.

Por otro lado, el throughput agregado de los mUEs se reduce ligeramente cuando se incrementan los RBs asignados a los enlaces de acceso de los RNs. Esto es debido a que un mayor número de UEs se conectan a los DeNBs, y la mayor parte de estos mUEs adicionales pertenecen a las zonas exteriores de los DeNBs. Por lo tanto, un mayor porcentaje de los RBs disponibles son asignados a mUEs de las zonas 1 y 2, usando MCSs más bajos. De forma adicional, el throughput agregado de los mUEs se reduce notablemente en el caso de los esquemas basados en SFR cuando se incrementa la capacidad de los enlaces backhaul, ya que se reducen los RBs disponibles para los enlaces directos. De hecho, todos los RBs del sistema se planifican para los enlaces backhaul en las subtramas backhaul cuando se asigna un promedio de 4.5 RBs al enlace backhaul de cada RN (esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs).

Como puede verse en los resultados, para la configuración de 4 RNs por sector la ganancia que se obtiene al aumentar de 2 a 3 los GrRBs asignados a los enlaces de acceso es muy reducida. Cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 4 RNs por sector se alcanza el mismo reuso frecuencial, que cuando se asignan 4 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 2 RNs por sector. Sin embargo, si se comparan los resultados obtenidos para ambas configuraciones de despliegue (Tabla 4.11 y Tabla 4.14), puede verse que es más ventajoso desplegar un mayor número de RNs, que incrementar excesivamente los recursos frecuenciales reutilizados por cada RN para sus enlaces de acceso.

En la Figura 4.31(a) se compara la CDF del throughput recibido por los UEs, cuando se emplea el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) para la configuración de 2 RNs por sector, frente al esquema SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) para la configuración de 4 RNs por sector. Además de incrementar el throughput global del sistema, la configuración de 4 RNs por sector también mejora la CDF del throughput recibido por los UEs. Ya que mejora el throughput recibido por los UEs que reciben un throughput promedio bajo-medio, a costa de degradar el throughput de los UEs que reciben un throughput promedio alto, obteniéndose una distribución más equitativa. En la Figura 4.31(b) y la Figura 4.31(c) se representa la CDF del throughput recibido, pero diferenciando entre mUEs y rUEs respectivamente. La configuración de 4 RNs por sector permite mejorar la CDF del throughput recibido por los mUEs gracias a que un mayor número de usuarios se conectan a los RNs. Por lo tanto, menos UEs se conectan a los DeNBs y los mUEs pueden recibir más asignaciones de RBs, alcanzando un throughput más elevado. Respecto a los rUEs se puede

observar que se mejora el throughput recibido por los rUEs que reciben un throughput promedio bajo, mientras que se reduce el throughput de los rUEs que observan un throughput medio-alto.

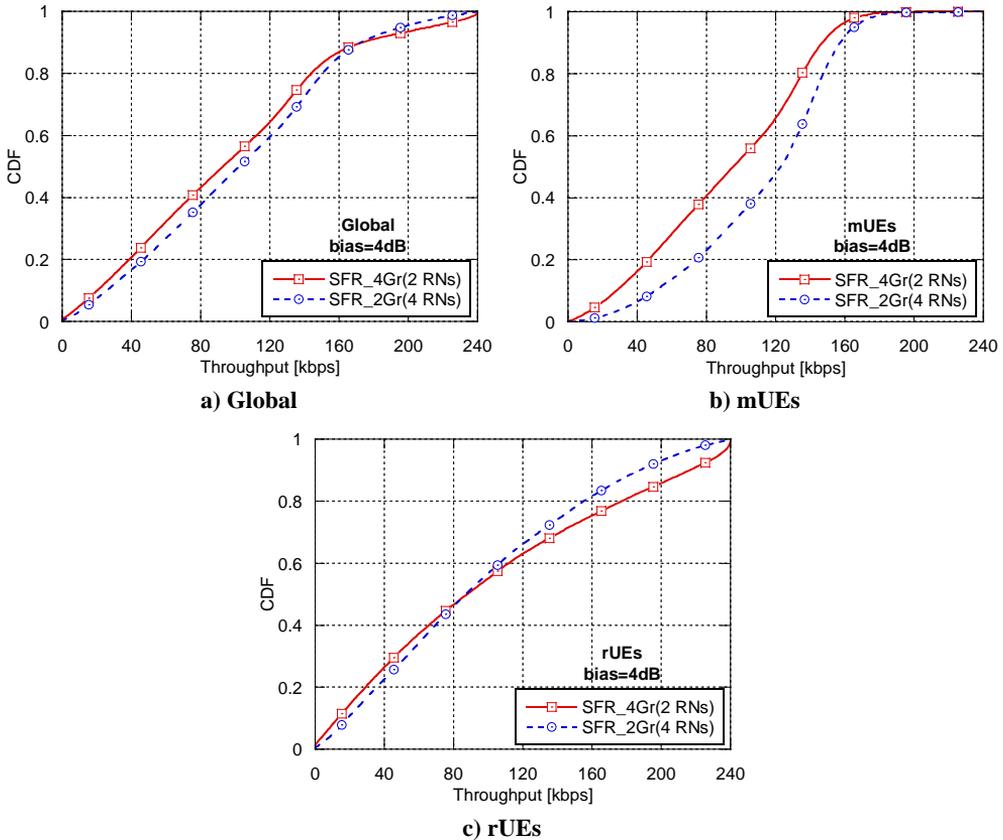


Figura 4.31: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector)

En la Figura 4.32, en la que se compara la CDF de la SINR observada por los rUEs para ambas configuraciones de despliegue, puede verse que la configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, proporcionando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso. Gracias a ello se mejora la CDF del throughput de los rUEs que observan un throughput promedio bajo, ya que al observar mayores niveles de SINR es menos probable que no puedan recibir recursos al no alcanzar los requisitos de SINR del MCS más bajo y, además, pueden recibir asignaciones con MCSs más elevados. Por otro lado, cuando se despliegan 4 RNs en cada sector un mayor número de UEs se conectan a los RNs, y por lo tanto los rUEs reciben menos asignaciones de RBs, reduciéndose la CDF del throughput de los rUEs que reciben un throughput promedio medio-alto.

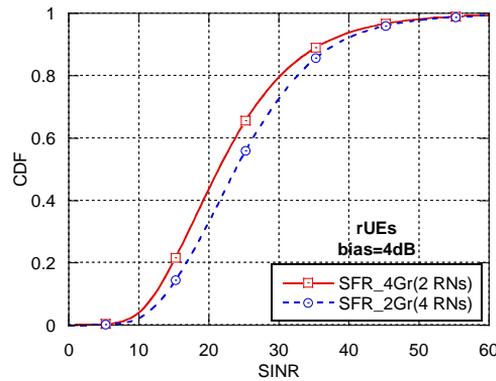


Figura 4.32: CDF de la SINR observada por los rUEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector)

Respecto a los enlaces backhaul, la capacidad promedio alcanzada por RB en la configuración de 4 RNs por sector (229.4 Kbps/RB) es ligeramente inferior a la alcanzada en la configuración de 2 RNs por sector (236.4 Kbps/RB). Esta diferencia se debe a que los RNs están desplegados a diferentes ángulos respecto a la dirección de máxima radiación de la antena del sector que les da servicio. Es decir, en la configuración de 2 RNs por sector, los dos RNs de cada sector se encuentran a 30° de diferencia respecto a la dirección de máxima radiación de la antena de su sector. Mientras que en la configuración de 4 RNs por sector, los dos RNs ubicados en el centro del sector (RN1 y RN2 en el sector A) se encuentran a 15° de diferencia, y los dos RNs ubicados más cerca de las fronteras del sector (RN0 y RN3 en el sector A) se encuentran a 45° de diferencia. Como los RNs utilizan una antena direccional para conectarse con sus DeNBs, la interferencia proveniente de los DeNBs adyacentes se ve fuertemente atenuada, y la interferencia dominante proviene del propio DeNB que da servicio al RN. Por lo tanto, los dos RNs ubicados en el centro del sector reciben mejores niveles de SINR que en el caso de la configuración de 2 RNs por sector, ya que reciben un mayor nivel de señal útil de su propio sector y al mismo tiempo están más protegidos de la interferencia intra-celular proveniente de los otros dos sectores del DeNB. Por el contrario, los dos RNs ubicados más cerca de la frontera reciben peores niveles de SINR que en el caso de la configuración de 2 RNs por sector, ya que reciben un menor nivel de señal útil de su propio sector, y además reciben un mayor nivel de interferencia intra-celular de los sectores adyacentes.

En los resultados de la configuración de 2 RNs por sector se ha visto que desplegando los RNs más hacia el exterior de la celda se consigue mejorar notablemente el throughput agregado de los UEs de la zona 2, gracias a que más UEs de esta zona se conectan a los RNs, viéndose beneficiados de mejores condiciones de canal. En la Tabla 4.15 se muestra el throughput promedio por

celda (Mbps) para los esquemas basados en FFR y SFR para la configuración de 4 RNs por sector, pero desplegando los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$). Si se analizan los resultados obtenidos para la configuración de 4 RNs por sector para ambas distancias de despliegue (d), en líneas generales se extraen las mismas conclusiones que las comentadas para la configuración de 2 RNs por sector. En concreto, respecto al throughput global del sistema, puede verse que en general cuando los RNs se despliegan a mayor distancia del centro de la celda también se ve reducido, debido principalmente a que se reduce el throughput agregado de los rUEs. Como los RNs se despliegan más lejos del DeNB, se conectan a los RNs usuarios que se encuentran más alejados de los RNs que les dan servicio. Estos rUEs son más vulnerables a las interferencias, y reciben sus asignaciones con MCSs más bajos, reduciendo el throughput agregado de los rUEs. Respecto a los enlaces directos, el throughput agregado de los mUEs es muy similar, siendo ligeramente superior cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, gracias a que un menor número de UEs de la zona 2 se conectan a los DeNBs. Finalmente, para los enlaces backhaul se obtienen los mismos resultados en ambos casos, ya que cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, tanto la señal útil como la señal interferente dominante sufren la misma atenuación adicional, obteniéndose valores de SINR similares.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama Acceso		Subtrama Backhaul		Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	mUEs	Backhaul	
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	5.97	10.31	1.24	11.01	17.52 (64.5%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 4	4	5.92	10.47	1.22	11.01	17.61 (65.4%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 4	4	5.88	9.79	1.22	11.01	16.89 (58.6%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 4	4	6.12	10.68	1.21	11.01	18.01 (69.1%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 4.5	4	5.97	12.15	0	12.39	18.12 (70.1%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 4.5	4	5.94	12.06	0	12.39	18.00 (69.0%)

Tabla 4.15: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$)

En la Tabla 4.16 se compara el throughput promedio por celda (Mbps) de los esquemas basados en FFR y SFR para la configuración de 4 RNs por sector, para las dos distancias (d) consideradas, pero desglosando el throughput promedio obtenido para cada una de las zonas del DeNB. De la misma forma que para la configuración de 2 RNs por sector, puede verse que al desplegar los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2 se incrementa notablemente el throughput agregado de los UEs de la zona 2, gracias a que más UEs de esta zona se conectan a los RNs, y se ven beneficiados de mejores condiciones de canal. Si se comparan estos resultados, con los obtenidos para la configuración de 2 RNs por

sector (Tabla 4.13), se comprueba que el despliegue de 4 RNs por sector también permite alcanzar una mayor ganancia en la zona exterior de los DeNBs cuando los RNs se despliegan más lejos del DeNB. Se puede llegar a alcanzar una ganancia superior al 175% en el throughput agregado de los UEs de la zona 2, respecto al throughput logrado por la red macrocelular convencional, con los esquemas SFR_3GrRBs y SFR_4GrRBs.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Global [Mbps]	Zona 0 [Mbps]	Zona 1 [Mbps]	Zona 2 [Mbps]
Los RNs se despliegan a 2/3 del radio de la celda respecto al DeNB ($d = 2/3 \cdot R$)						
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	17.50 (64.3%)	6.38 (24.4%)	7.57 (132.9%)	3.55 (56.4%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 4	4	17.65 (65.7%)	6.06 (18.1%)	8.02 (146.8%)	3.57 (57.3%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 4	4	16.97 (59.3%)	5.79 (12.9%)	7.75 (138.5%)	3.43 (51.1%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 4	4	18.31 (71.9%)	7.14 (39.2%)	7.64 (135.1%)	3.53 (55.5%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 4.5	4	18.35 (72.3%)	5.85 (14.0%)	8.64 (165.8%)	3.86 (70.0%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 4.5	4	18.26 (71.5%)	5.66 (10.3%)	8.69 (167.4%)	3.91 (72.2%)
Los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)						
FFR_2GrRBs - Back_op3	6 / 4	4	17.52 (64.5%)	5.96 (16.2%)	5.94 (82.8%)	5.62 (147.6%)
FFR_3GrRBs - Back_op3	9 / 4	4	17.61 (65.4%)	5.67 (10.5%)	6.16 (89.5%)	5.78 (154.6%)
FFR_4GrRBs - Back_op3	12 / 4	4	16.89 (58.6%)	5.47 (6.6%)	5.89 (81.2%)	5.53 (143.6%)
SFR_2GrRBs - Back_op4	6 / 4	4	18.01 (69.1%)	6.61 (28.8%)	6.14 (88.9%)	5.26 (131.7%)
SFR_3GrRBs - Back_op4	9 / 4.5	4	18.12 (70.1%)	5.28 (2.9%)	6.59 (102.8%)	6.25 (175.3%)
SFR_4GrRBs - Back_op4	12 / 4.5	4	18.00 (69.0%)	5.11 (-0.4%)	6.54 (101.2%)	6.35 (179.7%)

Tabla 4.16: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en FFR y SFR (4 RNs por sector, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$)

Por el contrario, el throughput agregado de los UEs de las zonas 0 y 1 se ve reducido cuando los RNs se despliegan más hacia el exterior de la celda, de la misma forma que en la configuración de 2 RNs por sector. Al desplegar los RNs más lejos del DeNB, un mayor número de UEs de ambas zonas se conectan a los DeNBs, y aunque no observan malas condiciones de canal respecto al DeNB, cuentan con menos RBs disponibles en los DeNBs, recibiendo menos asignaciones y, por lo tanto, obteniendo un throughput más bajo, que cuando se conectaban a los RNs. Además, los rUEs de las zonas 0 y 1 se encuentran ahora más lejos de los RNs que les dan servicio, por lo que observan peores condiciones de canal y alcanzan un throughput más bajo. Todo ello provoca que el throughput agregado de los UEs de ambas zonas sea inferior al desplegar los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2.

Por lo tanto, aunque el throughput global del sistema se reduce cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, se mejora notablemente el

throughput agregado de los usuarios exteriores (zona 2), consiguiéndose una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de la celda. En la Figura 4.33 se representa la CDF del throughput recibido por los UEs de las diferentes zonas de la celda, para el esquema SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) para la configuración de 4 RNs por sector, desplegando los RNs en las dos distancias (d) consideradas. Además, a modo de comparación, también se representa la CDF del throughput obtenida para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) para la configuración de 2 RNs por sector, cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. En los tres casos se aplica un bias de 4dB al criterio de selección de nodo.

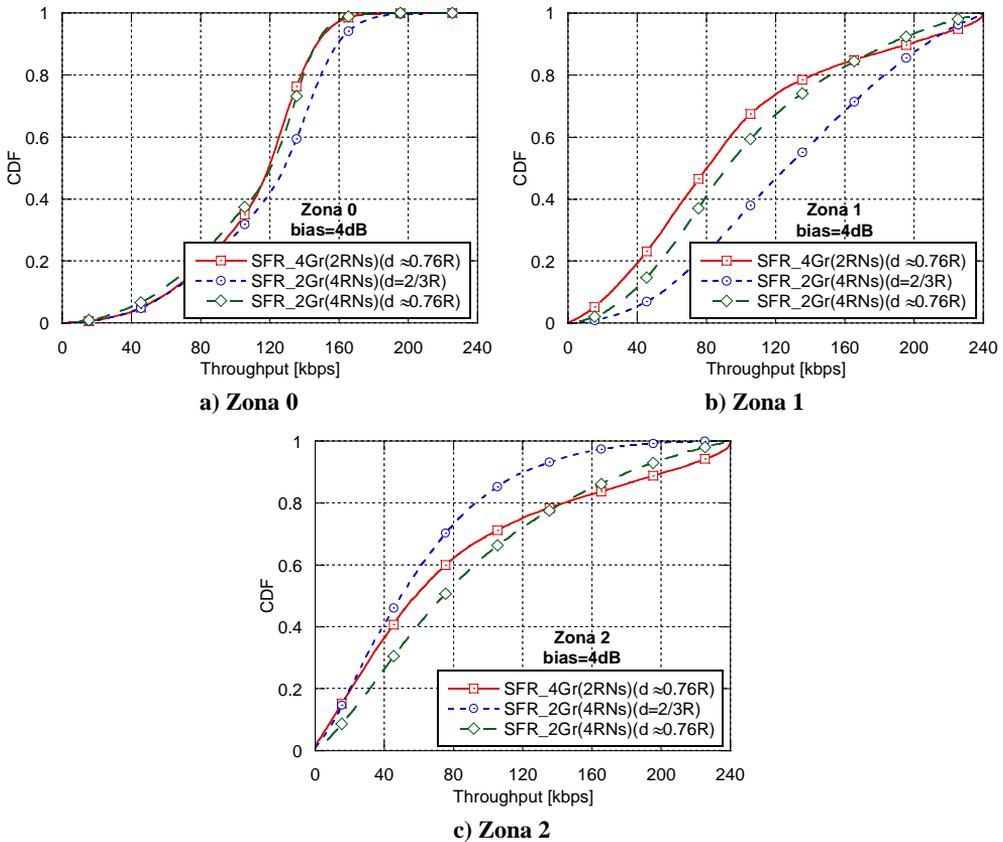


Figura 4.33: CDF del throughput recibido por los UEs para el esquema SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs) (2 RNs por sector) y SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), desplegando los RNs a $2/3$ del radio de la celda ($d = 2/3 \cdot R$) y en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)

Comparando en primer lugar los resultados para la configuración de 4 RNs por sector considerando las dos distancias de despliegue (d), se observa con más detalle cómo se mejoran significativamente las prestaciones de los UEs

exteriores cuando los RNs son desplegados en la zona exterior de las celdas ($d \approx 0.76 \cdot R$). La contrapartida es que se degradan las prestaciones de los UEs de la zona 0, y especialmente de la zona 1, ya que cuando los RNs se despliegan a $2/3$ del radio de la celda son los UEs de la zona 1 los que se encuentran más cerca de los RNs.

Si ahora se comparan los resultados obtenidos para ambas configuraciones de despliegue cuando los RNs son desplegados en la frontera entre las zonas 1 y 2, puede verse que cuando se despliegan 4 RNs en cada sector se mejoran las prestaciones de los UEs de las zonas 1 y 2 que reciben un throughput bajo-medio, a costa de empeorar las prestaciones de los UEs de ambas zonas que reciben un throughput alto. Por lo tanto, además de ofrecer un mayor throughput agregado para los UEs de las zonas 1 y 2, desplegar 4 RNs por sector también permite garantizar una CDF del throughput más equitativa en las zonas exteriores de la celda. La mejora de prestaciones para los UEs de las zonas 1 y 2 que reciben un throughput bajo-medio proporcionada por la configuración de 4 RNs por sector se debe a la mejora de la CDF del throughput recibido por los mUEs (similar a la representada en la Figura 4.31(b)), junto con la mejora de prestaciones de los rUEs que reciben un throughput promedio bajo (similar a la representada en la Figura 4.31(c)). Mientras que la degradación de prestaciones de los UEs de las zonas 1 y 2 que reciben un throughput alto cuando se despliegan 4 RNs por sector se debe a la degradación de prestaciones de los rUEs que reciben un throughput promedio alto (similar a la mostrada en la Figura 4.31(c)). Por último, las prestaciones de los UEs de la zona 0 son muy similares para ambas configuraciones.

4.4.7.7 Conclusiones

En este apartado se han propuesto esquemas de ICIC y RA para despliegues RNs con el objetivo de mejorar las prestaciones ofrecidas por los esquemas preliminares analizados en el apartado 4.3. Los resultados obtenidos para la configuración de 2 RNs por sector muestran que, gracias a incrementar el reuso frecuencial, tanto en las subtramas de acceso como en las subtramas backhaul, los esquemas propuestos mejoran significativamente el throughput global del sistema respecto a los esquemas de ICIC preliminares. Desde el punto de vista de las subtramas de acceso, se han incrementado los recursos planificados para los enlaces de acceso de los RNs hasta los 4 GrRBs, incrementando notablemente el throughput global del sistema, gracias al aumento del throughput agregado de los rUEs. Respecto a las subtramas backhaul se ha conseguido duplicar la capacidad de los enlaces backhaul con los esquemas Back_op3 y Back_op4, gracias a incrementar el reuso frecuencial duplicando los RBs que se planifican para los enlaces backhaul. Sin embargo, son los enlaces

directos los que ven degradadas sus prestaciones en las subtramas backhaul al recibir mayores niveles de interferencia, debido al incremento del reuso frecuencial. No obstante, ese incremento de capacidad en los enlaces backhaul permite incrementar los RBs asignados a los enlaces de acceso de los RNs, permitiendo satisfacer un mayor throughput agregado de los rUEs, y permitiendo obtener una ganancia significativa a nivel de throughput global. En la Figura 4.34 se representa el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos más relevantes, representando de forma separada el throughput agregado de los mUEs y rUEs. Además, también se representa el esquema SFR_bm_op2 a modo de referencia, ya que es el esquema de ICIC preliminar que mejores prestaciones ofrece. Los esquemas propuestos basados en FFR y SFR para la configuración de 2 RNs por sector permiten incrementar notablemente el throughput global del sistema, respecto a los esquemas de ICIC preliminares.

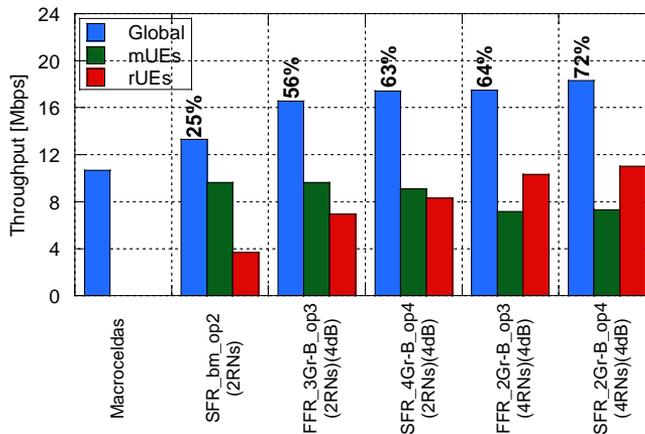


Figura 4.34: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes ($d = 2/3 \cdot R$)

Esta mejora en las prestaciones del sistema, debida al incremento del reuso frecuencial en ambas subtramas, es posible gracias a la definición de RBs prioritarios para los sectores de los DeNBs. Ya que esto permite planificar los recursos que son asignados a los enlaces de acceso y enlaces backhaul, con los que son prioritariamente asignados por los enlaces directos de los diferentes sectores, minimizando la interferencia generada entre los diferentes nodos y enlaces, y mejorando las prestaciones del sistema. De los esquemas propuestos, son los esquemas basados en SFR los que ofrecen las mejores prestaciones, gracias a que se planifican para los enlaces de acceso de los RNs aquellos GrRBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, minimizando la interferencia cross-layer e incrementando notablemente el throughput agregado de los rUEs.

También se ha analizado la aplicación del criterio CRE añadiendo un bias positivo al criterio de selección de nodo, con el objetivo de que un mayor número de UEs se conecten a los RNs, y se aprovechen mejor los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso. Los resultados muestran que la aplicación del bias permite incrementar el throughput global del sistema, principalmente gracias a que un mayor número de UEs se ven beneficiados de las ventajas que proporciona el despliegue de RNs, incrementándose el throughput agregado de los rUEs. Esta ganancia es mayor a medida que se incrementan los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso, ya que esto conlleva que un mayor número de RBs se queden sin asignar si no se aplica bias y, por lo tanto, los rUEs adicionales que se conectan al aplicar el bias disponen de una mayor cantidad de RBs libres, obteniendo una mayor mejora del throughput global.

Los esquemas de ICIC propuestos para la configuración de 2 RNs por sector permiten alcanzar una ganancia en el throughput global del sistema de hasta el 63%, comparado con el escenario macrocelular convencional. No obstante, desplegar un mayor número de RNs en los DeNBs permite incrementar las prestaciones del sistema todavía más, gracias a que un mayor número de usuarios se benefician de observar mejores condiciones de canal al estar conectados a los RNs. Cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 4 RNs por sector se alcanza el mismo reuso frecuencial, que cuando se asignan 4 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 2 RNs por sector. Sin embargo, es más ventajoso desplegar un mayor número de RNs, que incrementar excesivamente los recursos frecuenciales reutilizados por cada RN para sus enlaces de acceso. Esto es debido a que la configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, garantizando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso. Esta mejora permite que la ganancia alcanzada en el throughput global del sistema se incremente hasta el 72%.

En general, los UEs de las zonas más alejadas de los DeNBs no observan buenas condiciones de canal debido a que se encuentran bastante lejos del nodo que les da servicio. Con el objetivo de potenciar que más UEs de la zona 2 se conecten a los RNs, y se beneficien de unas mejores condiciones de canal, se han analizado los resultados cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. En la Figura 4.35 se representa el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos más relevantes cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$). Además del throughput global, también se representa el throughput agregado para cada una de las tres zonas de la celda. El throughput global del sistema se reduce cuando los RNs se despliegan más lejos del DeNB, sin embargo, se consigue una mejora muy significativa en el throughput agregado de los UEs de la zona 2, gracias a

que un mayor número de UEs de esta zona se conectan a los RNs. Esto permite obtener una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de la celda. En la Figura 4.35 también se representan los resultados obtenidos para el escenario macrocelular convencional, observándose la gran mejora que se obtiene para los UEs de las zonas exteriores. La configuración de 4 RNs por sector ofrece los mejores resultados, tanto a nivel de throughput global, como a nivel del throughput agregado de los UEs de la zona 2, proporcionando la distribución de throughput más equitativa.

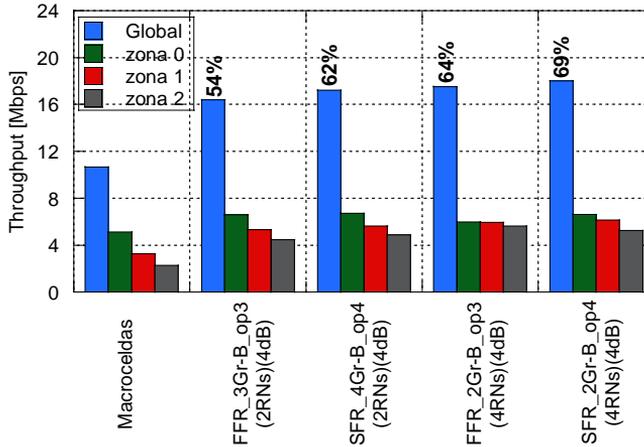


Figura 4.35: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes, mostrando el throughput agregado por zona ($d \approx 0.76 \cdot R$)

4.5 Esquemas propuestos de ICIC y RA basados en una estructura de combinación de tramas entre RNs

4.5.1 Estructura de combinación de tramas

Tal y como se ha visto a lo largo de este capítulo, las subtramas de acceso y backhaul, multiplexadas en tiempo (TDM), se alternan para cada relay, como se representa en la Figura 4.8. Sin embargo, no es necesario que todas las subtramas de acceso y backhaul estén sincronizadas para todos los relays del DeNB. Por lo tanto, desde el punto de vista del DeNB, se han considerado dos configuraciones de trama distintas. Por un lado, la solución estándar (Figura 4.8), en la que durante las subtramas backhaul todos los RNs reciben sus datos del DeNB, mientras que, durante las subtramas de acceso, todos los RNs asignan a sus usuarios. Y, por otro lado, la estructura de combinación propuesta, representada en la Figura 4.36. En este caso, los relays se dividen en dos grupos: pares e impares. En las subtramas A, el grupo de RNs pares transmite sus enlaces de acceso, mientras que el otro grupo, los RNs impares, recibe sus

enlaces backhaul. En las subtramas B, la operación es la opuesta, de tal manera que los RNs impares transmiten sus enlaces de acceso, y los RNs pares reciben sus enlaces backhaul.

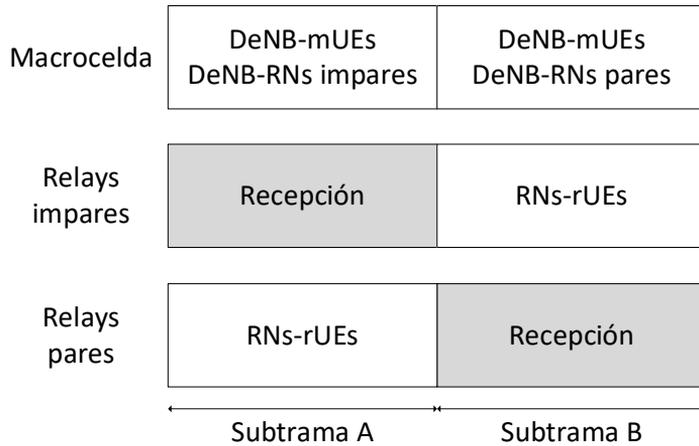


Figura 4.36: Estructura de combinación de tramas

En los esquemas de asignación de recursos descritos hasta ahora se ha empleado la estructura de trama convencional, asumiendo que las subtramas de acceso y backhaul son las mismas para todos los RNs. Por lo tanto, si se toma como referencia la configuración de 2 RNs por sector, los enlaces de acceso de cada relay son principalmente interferidos por los seis relays vecinos. Dos de ellos pertenecen a su propio DeNB y los cuatro restantes pertenecen a DeNBs adyacentes. Por ejemplo, el RN0 de la celda 1 recibe interferencia principalmente del RN1 y del RN5 de la celda 1, del RN3 y del RN4 de la celda 2 y del RN2 y del RN3 de la celda 3. Sin embargo, si se considera la estructura de combinación de tramas (Figura 4.36), los RNs pares transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas A, mientras los RNs impares reciben sus enlaces backhaul. En las subtramas B, la operación es la opuesta. Tal y como puede observarse en la Figura 4.37, en este caso, cada RN solo recibe interferencia en sus enlaces de acceso principalmente de dos RNs, ya que el resto de RNs vecinos se encuentran recibiendo sus enlaces backhaul. Por ejemplo, para el caso concreto del RN0 de la celda 1 en las subtramas A, sus enlaces de acceso son principalmente interferidos por el RN4 de la celda 2 y el RN2 de la celda 3. Con respecto a los enlaces backhaul, si se considera la estructura de combinación de tramas solo tres relays de cada DeNB reciben sus enlaces backhaul en cada subtrama (Figura 4.37). Por lo tanto, los DeNBs no necesitan tantos recursos de manera simultánea para asignar sus enlaces backhaul. Teniendo en cuenta estos aspectos, el objetivo de la estructura de combinación de tramas que se propone es facilitar el reuso frecuencial, tratando de ofrecer menores niveles de

interferencia a los enlaces de acceso, así como permitir una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. Hay que tener en cuenta que, si se considera la estructura de combinación de tramas, es necesario adoptar diferentes estrategias de RA e ICIC, como puede verse en los siguientes subapartados.

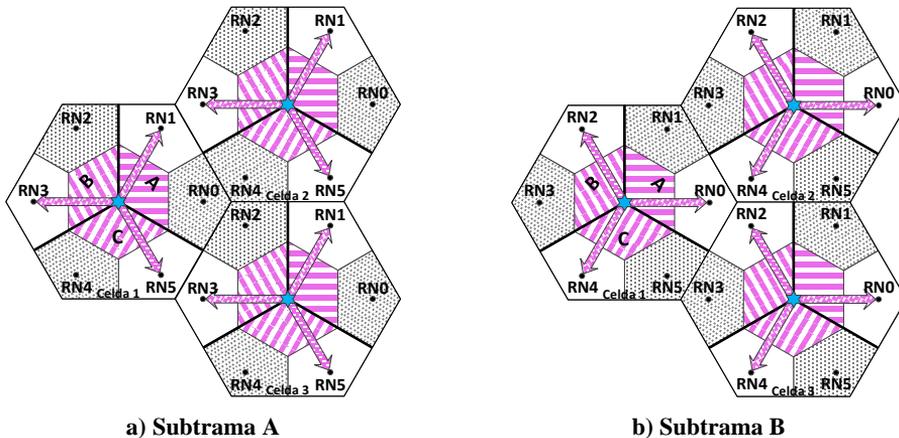


Figura 4.37: Ejemplo de aplicación de la estructura de combinación de tramas

4.5.2 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, considerando el despliegue de 2 RNs por sector: CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs

El esquema de RA que se propone en este subapartado se basa en la estructura de combinación de tramas (Figura 4.36), y la asignación de recursos para las subtramas A y B se representa en la Figura 4.38 y la Figura 4.39, respectivamente. Se han propuesto tres versiones, de tal forma que en la primera versión se asignan dos grupos de recursos a los enlaces de acceso de cada relay (CS_2GrRBs), en la segunda versión se incrementa a tres los GrRBs asignados a cada relay (CS_3GrRBs), y finalmente, en la tercera versión se añade un cuarto GrRB (CS_4GrRBs), representándose en la Figura 4.38 y la Figura 4.39 qué grupo se escoge en primer lugar.

En estos esquemas se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.38 y la Figura 4.39, de tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, un sector solo puede asignar en sus enlaces directos un RB planificado para otro sector cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular

adicional. Es decir, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Además, continuando con la filosofía aplicada en los esquemas de RA previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. No se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema. Esta propuesta, que está alineada con los esquemas de RA basados en la estructura de trama convencional, facilita el reparto de recursos entre los enlaces de acceso de los RNs.

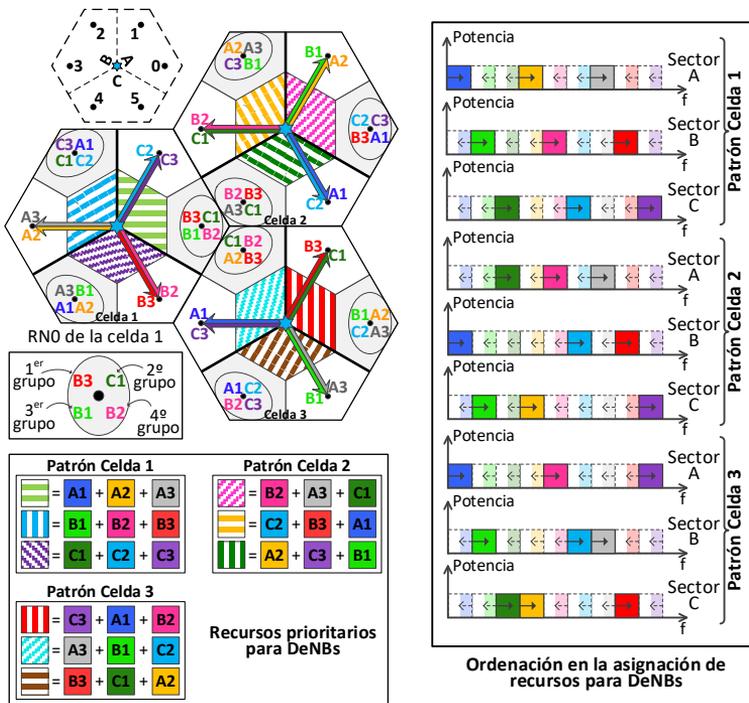


Figura 4.38: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A (2 RNs por sector)

Si se toma como referencia el sector A de la celda 1 para la subtrama A (Figura 4.38), y continuando con la filosofía de los esquemas basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional, los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0 son los grupos B1, B2, B3, C1, C2 y C3, ya que se evitan los GrRBs potencialmente asignados por el sector A para sus enlaces directos (A1, A2 y A3). Además, como el esquema de ICIC se basa en la estructura de combinación de tramas, es necesario tener en cuenta también los GrRBs a asignar a los enlaces backhaul del RN1, ya que estos GrRBs dejarán de estar disponibles para los enlaces de acceso del RN0. Por lo tanto, una vez

planificados los GrRBs para los enlaces backhaul del RN1, quedarán ya definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0. Aplicando la misma estrategia que en los esquemas Back_op3 y Back_op4, cada GrRB asignado a los enlaces backhaul se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB, y con el objetivo de minimizar la interferencia intra-celular, se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto. De esta forma, para los enlaces backhaul del RN1 los grupos C1, C2 y C3 son los disponibles. Para decidir los dos grupos planificados para el enlace backhaul del RN1, y decidir el grupo restante que quedará disponible para los enlaces de acceso del RN0, se analizan las condiciones de interferencia que observarían los rUEs del RN0. De esta forma se trata de proporcionar a los enlaces de acceso de los RNs aquellos GrRBs que reciben menores niveles de interferencia cross-layer de los DeNBs.

En primer lugar, se analizan las condiciones de interferencia de los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0, teniendo en cuenta únicamente los GrRBs planificados para los enlaces directos de los DeNBs. El grupo B1 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2 y por el sector B de la celda 3, el grupo C3 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2, el grupo C2 es asignado potencialmente por el sector B de la celda 3, mientras que los grupos B2, B3 y C1 no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Si se planifican los grupos C2 y C3 para el enlace backhaul del RN1, además de asignar al enlace backhaul los GrRBs en los que los enlaces de acceso del RN0 reciben más interferencia de los DeNBs adyacentes, también se coordinan los GrRBs asignados a los enlaces backhaul del RN5 de la celda 2 y del RN3 de la celda 3. Hay que tener en cuenta que los enlaces backhaul de estos dos RNs serán asignados por los sectores interferentes dominantes, continuando con el análisis de interferencia de los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1. Por lo que, aplicando el mismo planteamiento, los grupos A1 y C2 son planificados para el backhaul del RN5 de la celda 2 y los grupos A1 y C3 son asignados al backhaul del RN3 de la celda 3. El grupo A1 pertenece a los GrRBs planificados para el sector A de la celda 1, y por lo tanto no está incluido en los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1. Y los grupos C2 y C3 son precisamente los grupos planificados para el enlace backhaul del RN1 de la celda 1, y por lo tanto ya no están incluidos en los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1. De esta forma, incorporando al análisis de interferencia los GrRBs planificados para los enlaces backhaul, se consiguen mantener los grupos B2, B3 y C1 sin ser interferidos por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes, pudiendo ofrecer a los enlaces de acceso de los RNs recursos con bajos niveles de interferencia cross-layer.

Una vez definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso de cada RN nos centramos en decidir qué grupos se escogen en primer lugar. Continuando con el análisis del RN0 de la celda 1 para la subtrama A (Figura 4.38) como ejemplo de referencia, los grupos disponibles para sus enlaces de acceso son los grupos B1, B2, B3 y C1. El grupo B1 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2 y por el sector B de la celda 3, mientras que los grupos B2, B3 y C1 no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Para seleccionar los dos primeros GrRBs se aplica la misma filosofía que en el esquema SFR_2GrRBs, escogiendo los GrRBs que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de las celdas vecinas. De esta forma, los tres GrRBs B2, B3 y C1 tienen que ser compartidos por el RN0 de la celda 1, el RN4 de la celda 2 y el RN2 de la celda 3. La solución propuesta es la misma que en el esquema SFR_2GrRBs, y cada uno de los tres GrRBs disponibles es reutilizado por solo dos de los tres RNs considerados, con el objetivo de que la interferencia co-layer generada no sea excesiva.

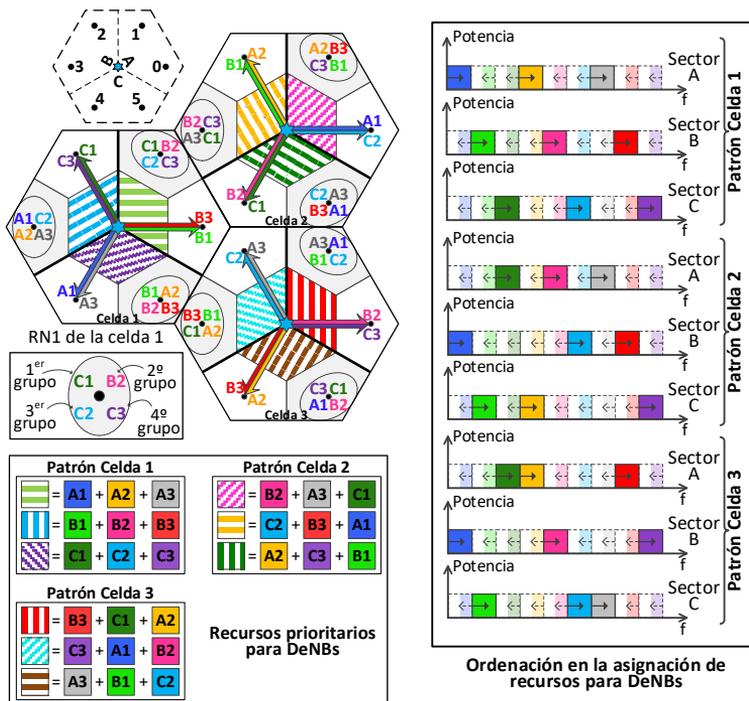


Figura 4.39: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas B (2 RNs por sector)

En una situación de baja carga, si solo se necesitase asignar un GrRB a cada RN, tanto en los enlaces de acceso, como en el enlace backhaul, las asignaciones en los enlaces backhaul siguen la dirección contraria a las agujas del reloj en la

Figura 4.38. Es decir, los grupos C2, A2 y B2 son los asignados en la celda 1 para los enlaces backhaul del RN1, RN3, y RN5 respectivamente. Esta elección de los enlaces backhaul permite reducir la interferencia cross-layer que reciben los enlaces de acceso, ya que el primer GrRB (B3 para el RN0) dejaría de recibir interferencia del enlace backhaul de su sector adyacente. Además, cada uno de los tres RNs vecinos pertenecientes a las celdas adyacentes utilizaría un GrRB diferente, reduciendo la interferencia co-layer. Si en esta situación de baja carga se comparan las condiciones de interferencia frente al esquema SFR_2GrRBs, restringiendo también en este caso los enlaces de acceso de los RNs al primer GrRB, puede observarse que la interferencia co-layer recibida por los rUEs es más débil en el esquema CS_2GrRBs, ya que el GrRB asignado a los enlaces de acceso no es reutilizado por ninguno de los RNs vecinos. La interferencia cross-layer que reciben los rUEs es similar en ambos esquemas, por lo que el esquema CS_2GrRBs consigue mejorar las condiciones de interferencia de los enlaces de acceso en condiciones de baja carga.

Si se continúa con la comparación de las condiciones de interferencia, pero en una situación de carga alta empleando los dos GrRBs asignados tanto a los enlaces de acceso como a los enlaces backhaul, puede observarse que la interferencia co-layer sufrida por los rUEs es ligeramente más débil en el caso del esquema CS_2GrRBs. Si se toman como referencia los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1, en el esquema CS_2GrRBs los grupos B3 y C1 son interferidos únicamente por un RN vecino de las celdas adyacentes. Mientras que para el esquema SFR_2GrRBs, el grupo C2 solo es interferido por un RN vecino, pero el grupo B3 es interferido por dos RNs vecinos. Sin embargo, la interferencia cross-layer recibida en los enlaces de acceso es ligeramente más fuerte en el esquema CS_2GrRBs, puesto que, aunque en ambos esquemas se seleccionan para los enlaces de acceso aquellos GrRBs que nos son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, en el esquema CS_2GrRBs hay que asignar también recursos a los enlaces backhaul, incrementándose la interferencia recibida del propio DeNB. En el esquema CS_2GrRBs el grupo C1 recibe interferencia del sector adyacente, y el grupo B3, además de recibir interferencia del sector opuesto, también recibe interferencia del sector adyacente debido a la asignación del grupo B3 al enlace backhaul del RN5.

De cara a incrementar la disponibilidad de recursos para los enlaces de acceso y aumentar el reuso frecuencial se selecciona el tercer GrRB para cada RN (CS_3GrRBs). Continuando con el análisis del RN0 de la celda 1 para la subtrama A (Figura 4.38) como ejemplo de referencia, se tiene que elegir entre los grupos B1 y B2. Si se seleccionase el grupo B2, aunque este grupo no es potencialmente asignado por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, los tres RNs vecinos utilizarían los tres mismos GrRBs (B2, B3 y

C1) y la interferencia co-layer podría ser excesiva. Por lo tanto, en tercer lugar, se escoge el grupo B1, que es potencialmente asignado por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Aunque ese tercer GrRB reciba fuerte interferencia cross-layer, esta elección permite asignar diferentes GrRBs a los relays vecinos, y por lo tanto evita incrementar la interferencia co-layer entre relays vecinos. Por último, se asigna el cuarto GrRB a los enlaces de acceso de cada RN, escogiendo el último grupo disponible (CS_4GrRBs). Esta última asignación conlleva que los tres RNs vecinos reutilicen los tres GrRBs que no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes, incrementando notablemente la interferencia co-layer. Sin embargo, ese incremento en la interferencia generada podría compensarse gracias a la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los RNs. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas basados en SFR, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

Comparando las condiciones de interferencia entre los esquemas CS_3GrRBs y SFR_3GrRBs para los enlaces de acceso, el esquema CS_3GrRBs continúa ofreciendo niveles de interferencia co-layer ligeramente más bajos, pero como contrapartida, ofrece niveles de interferencia cross-layer más elevados. Cuando se añade el cuarto GrRB (CS_4GrRBs y SFR_4GrRBs), el incremento en el reuso frecuencial entre RNs vecinos provoca que la interferencia co-layer sea bastante elevada en ambos esquemas.

Aunque la elección de los recursos para los diferentes enlaces se ha explicado para la subtrama A (Figura 4.38), para definir el esquema de ICIC y RA para la subtrama B (Figura 4.39) se ha seguido el mismo procedimiento. No obstante, merece la pena destacar que, con el objetivo de proporcionar las mejores condiciones de interferencia para los diferentes enlaces, y de garantizar prestaciones similares en ambos tipos de subtramas, se ha modificado el reparto de los recursos prioritarios para los DeNBs en el patrón de celda 3 de la subtrama A. Mientras que en el caso de la subtrama B el reparto de recursos prioritarios para los DeNBs es idéntico al aplicado en los esquemas de RA basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional. Si sobre la estructura de la subtrama A se aplica el mismo reparto de recursos prioritarios para los DeNB que en la subtrama B, y se sigue un procedimiento similar al expuesto en este subapartado para definir los recursos asignados a enlaces de acceso y enlaces backhaul, la solución a la que se llega no es tan óptima como la propuesta en la Figura 4.38, y además se obtendrían distintas prestaciones para cada tipo de subtrama. La diferencia en el reparto de recursos entre subtramas A y B se encuentra en los RNs que tienen que transmitir sus enlaces de acceso y los RNs que tienen que recibir sus enlaces backhaul en cada caso.

Desde el punto de vista de los enlaces directos, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular en ambos tipos de subtramas degradará las condiciones de interferencia sufridas por los mUEs si se comparan con las subtramas de acceso de los esquemas basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional (Figura 4.18 y Figura 4.21). Sin embargo, si se comparan con las condiciones de interferencia observadas por los mUEs en las subtramas backhaul del esquema Back_op4 (Figura 4.19(a)), las condiciones proporcionadas por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas son mejores. Por lo tanto, las condiciones de interferencia de los mUEs se empeoran respecto a las subtramas de acceso, pero se mejoran respecto a las subtramas backhaul. No obstante, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas aumentan la disponibilidad de RBs para los enlaces directos, pudiendo ofrecer mejores prestaciones a los mUEs.

Respecto a la asignación de recursos para los enlaces backhaul se ha aplicado la misma filosofía que en el esquema Back_op4, y los GrRBs asignados a los enlaces backhaul son potencialmente asignados a los mUEs del sector opuesto al RN, minimizando la interferencia intra-celular. Los RNs emplean una antena directiva para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente atenuada. Por lo tanto, las prestaciones obtenidas por los enlaces backhaul serán similares a las obtenidas en el esquema Back_op4.

Se puede concluir que en situaciones de baja carga el esquema de RA basado en la estructura de combinación de tramas ofrece mejores condiciones de interferencia para los enlaces de acceso, y a medida que se incrementa el número de GrRBs asignados a los enlaces de acceso y backhaul, se sigue reduciendo la interferencia co-layer sufrida por los rUEs, pero a costa de incrementar la interferencia cross-layer. No obstante, si el esquema de RA se diseña cuidadosamente, se pueden alcanzar condiciones de interferencia satisfactorias para los enlaces de acceso. Además, la mayor disponibilidad de RBs para los enlaces directos puede mejorar las prestaciones del sistema.

4.5.3 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, rotando el patrón temporal, y considerando el despliegue de 2 RNs por sector: CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs

En los esquemas propuestos en el subapartado anterior (Figura 4.38 y Figura 4.39), basados en la estructura de combinación de tramas, todas las celdas siguen el mismo patrón, de tal forma que en todas las celdas los RNs pares transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas A, mientras que los RNs impares reciben sus enlaces backhaul en las subtramas A. Sin embargo, no es necesario que todas las celdas sigan el mismo patrón. Tomando en cuenta este planteamiento en la

Figura 4.40 y la Figura 4.41 se representan los esquemas de ICIC y RA propuestos, basados en la estructura de combinación de tramas y rotando el patrón de la celda 1. De esta forma, los RNs pares de la celda 1 reciben sus enlaces backhaul en las subtramas A y transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas B, de forma contraria a los RNs de las celdas 2 y 3. El principal objetivo de esta estrategia es separar lo máximo posible los RNs que transmiten sus enlaces de acceso de forma simultánea, para reducir la interferencia co-layer generada. Si por ejemplo se toma como referencia el RN0 de la celda 1 en la subtrama B (Figura 4.41), los principales RNs interferentes son el RN3 de la celda 2 y el RN3 de la celda 3. Mientras que, si todas las celdas siguen el mismo patrón, los principales RNs interferentes para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1 (Figura 4.38) son el RN4 de la celda 2 y el RN2 de la celda 3, los cuales están situados más cerca, y por lo tanto, introducen mayor nivel de interferencia co-layer. Se han propuesto tres versiones, de tal forma que en la primera versión se asignan dos grupos de recursos a los enlaces de acceso de cada relay (CS_rot_2GrRBs), en la segunda versión se incrementa a tres los GrRBs asignados a cada relay (CS_rot_3GrRBs), y finalmente, en la tercera versión se añade un cuarto GrRB (CS_rot_4GrRBs), representándose en la Figura 4.40 y la Figura 4.41 qué grupo se escoge en primer lugar.

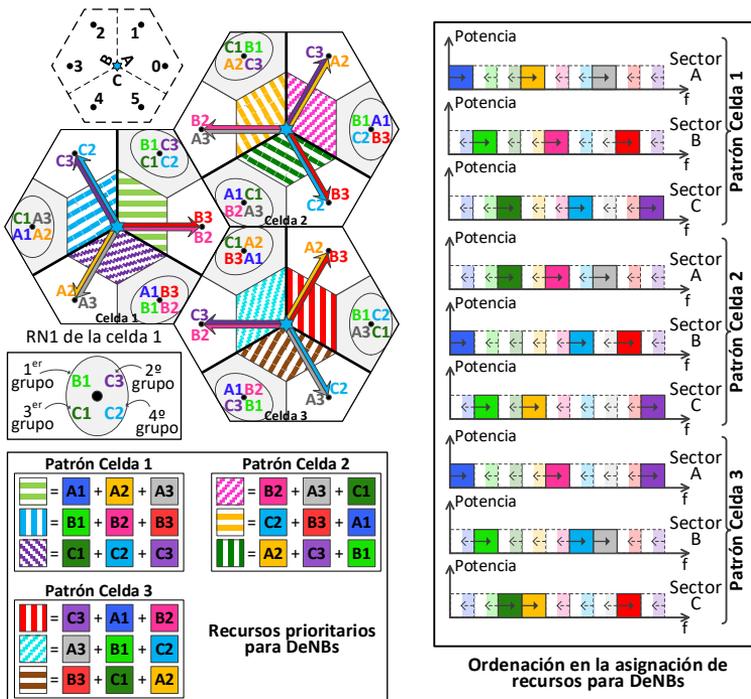


Figura 4.40: RA de los esquemas CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A (2 RNs por sector)

Siguiendo la misma filosofía que en los esquemas de RA previos propuestos para la estructura de combinación de tramas, se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.40 y la Figura 4.41, de tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Además, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Con el objetivo de facilitar el reparto de recursos entre los enlaces de acceso, no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

Tomando como referencia los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1 para la subtrama B (Figura 4.41), y si se evitan los GrRBs que serán asignados potencialmente por su propio sector, los GrRBs disponibles son los grupos B1, B2, B3, C1, C2 y C3. Además, también es necesario considerar los GrRBs que se van a asignar al enlace backhaul del RN1, ya que estos GrRBs dejarán de estar disponibles para los enlaces de acceso del RN0. Por lo tanto, una vez planificados los GrRBs para los enlaces backhaul del RN1, quedarán ya definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0. Aplicando la misma estrategia que en los esquemas Back_op3 y Back_op4, y con el objetivo de minimizar la interferencia intra-celular, para los enlaces backhaul se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto, reutilizando cada GrRB asignado a los enlaces backhaul un máximo de dos veces en el mismo DeNB. De esta forma, los GrRBs disponibles para los enlaces backhaul del RN1 son los grupos C1, C2 y C3. Para decidir los dos grupos más convenientes para el enlace backhaul del RN1 se analizan las condiciones de interferencia que observarían los enlaces de acceso de los diferentes RNs implicados. Merece la pena destacar que en los esquemas que se proponen en este subapartado no existe la simetría que se ha visto hasta ahora en los esquemas de ICIC previos, ya que se ha rotado el patrón temporal de asignación de las subtramas de acceso y backhaul en la celda 1.

Si se analizan las condiciones de interferencia de los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN0, teniendo en cuenta únicamente los GrRBs planificados para los enlaces directos de los DeNBs, el grupo C3 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2 y por el sector B de la celda 3, mientras que los grupos C1 y C2 no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Hay que tener en

cuenta que el sector A de la celda 1 es uno de los sectores interferentes dominantes para los enlaces de acceso del RN3 de la celda 2 y del RN5 de la celda 3, por lo que los GrRBs que se planifiquen para el enlace backhaul del RN1 tendrán un fuerte impacto en las condiciones de interferencia de los enlaces de acceso de ambos RNs. Teniendo en cuenta estas implicaciones, se seleccionan para el enlace backhaul del RN1 de la celda 1 los grupos C2 y C3. El grupo C2 se escoge porque no introduce interferencia adicional sobre los GrRBs que se encuentran disponibles para los enlaces de acceso del RN3 de la celda 2 y del RN5 de la celda 3. El grupo C3 sí que es uno de los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso de ambos RNs, pero se escoge debido a que desde el punto de vista de los rUEs del RN0 de la celda 1, este grupo recibe interferencia de los dos sectores interferentes dominantes de las celdas adyacentes. Por lo tanto, el grupo C1 se planificará para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1, ya que además este grupo no es potencialmente asignado por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes.

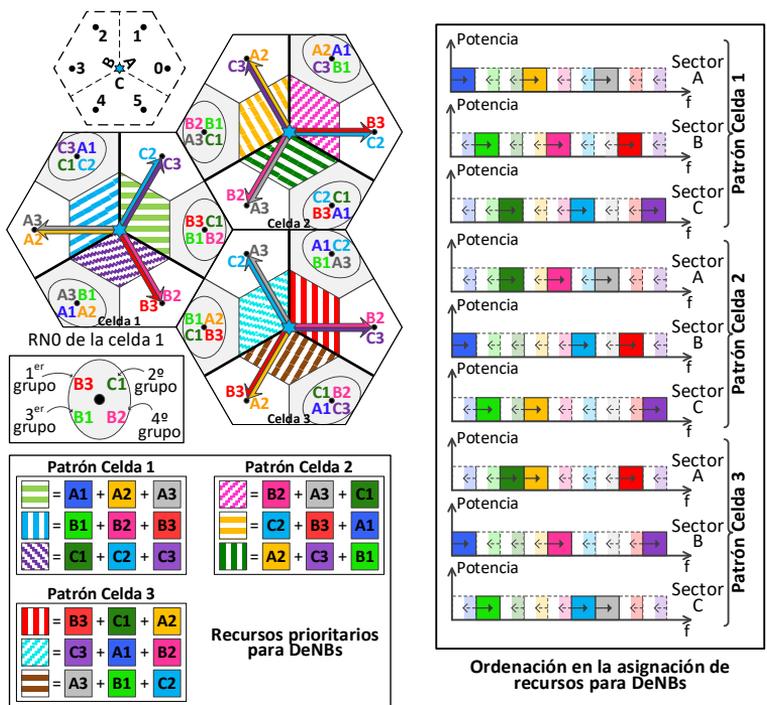


Figura 4.41: RA de los esquemas CS_rot_2GrRBs, CS_rot_3GrRBs y CS_rot_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas B (2 RNs por sector)

Aplicando un razonamiento similar, para el enlace backhaul del RN2 de la celda 2 se escogen los grupos C3 y A2. La elección del grupo C3 está coordinada con la elección también de este grupo para el enlace backhaul del RN1 de la celda 1, ya que la asignación del grupo C3 para el enlace backhaul del

RN1 de la celda 1 introduciría interferencia cross-layer sobre los enlaces de acceso del RN3 de la celda 2. Por lo que asignando este grupo al enlace backhaul del otro RN de su propio sector, el grupo C3 deja de estar disponible para los enlaces de acceso del RN3 de la celda 2 y se reduce el impacto de las asignaciones de los enlaces backhaul. El grupo A2 se coordina con la elección de este grupo también para el enlace backhaul del RN4 de la celda 3, con el objetivo de minimizar la interferencia cross-layer sobre los enlaces de acceso introducida por las asignaciones de los enlaces backhaul. Hay que tener en cuenta que el sector B de la celda 2 es uno de los sectores interferentes dominantes de los enlaces de acceso del RN5 de la celda 3, y el sector C de la celda 3 es uno de los sectores interferentes dominantes de los enlaces de acceso del RN3 de la celda 2. Para completar el enlace backhaul del RN4 de la celda 3 se escoge el grupo B3, ya que este grupo no se encuentra entre los GrRBs disponibles para los enlaces de acceso del RN2 de la celda 1 y del RN3 de la celda 2, reduciendo la interferencia cross-layer sufrida por los enlaces de acceso.

Para la elección de los GrRBs planificados para los enlaces backhaul del resto de RNs se ha seguido un planteamiento similar. Los objetivos que persiguen las elecciones de recursos para los enlaces backhaul son proporcionar a los enlaces de acceso de los RNs recursos en los que los niveles de interferencia cross-layer provenientes de los DeNBs no sean demasiado elevados, a la vez que se trata de que las asignaciones de GrRBs a los enlaces backhaul no incrementen en exceso la interferencia cross-layer y que las condiciones de interferencia sean similares en los enlaces de acceso de los diferentes RNs.

Al elegir los dos GrRBs asignados al enlace backhaul de cada RN, quedan ya definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso de cada RN, por lo que nos centramos en decidir qué grupos se escogen en primer lugar. Continuando con el análisis del RN0 de la celda 1 para la subtrama B (Figura 4.41) como referencia, los GrRBs disponibles para sus enlaces de acceso son los grupos B1, B2, B3 y C1. Analizando las condiciones de interferencia recibidas de los DeNBs adyacentes (enlaces directos y backhaul), el grupo B2 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2 y por el sector B de la celda 3, el grupo B1 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2, y los grupos B3 y C1 no son asignados potencialmente por los sectores interferentes dominantes. Como primer grupo para los enlaces de acceso se escoge el B3, ya que este grupo no es potencialmente asignado por los principales sectores interferentes de los DeNBs adyacentes. Además, escogiendo en el resto de RNs aquellos GrRBs que tampoco son potencialmente interferidos por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes, se pueden planificar diferentes GrRBs para RNs vecinos con el objetivo de minimizar también la interferencia co-layer.

Para escoger el segundo GrRB para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1 se aplica el mismo razonamiento eligiendo el grupo C1, que es el otro GrRB que tampoco es asignado potencialmente por sus sectores interferentes dominantes. Si se toma también como referencia el RN3 de la celda 2 y el RN5 de la celda 3, en el caso del RN5 de la celda 3 también se escoge un GrRB que no es asignado potencialmente por sus sectores interferentes dominantes (B2), mientras que para el RN3 de la celda 2 se escoge un GrRB que es potencialmente asignado por uno de los sectores interferentes dominantes (B1). El RN3 de la celda 2 y el RN5 de la celda 3 tienen disponibles los mismos dos grupos (B2 y C1) en los que potencialmente no recibirán interferencia de los sectores interferentes dominantes, por lo que en lugar de asignar los dos mismos GrRBs a ambos RNs, en el caso del RN3 de la celda 2 se escoge un GrRB donde la interferencia cross-layer será más elevada, con el objetivo de no incrementar en exceso la interferencia co-layer entre ambos RNs. Además, el grupo C1 también ha sido asignado al RN0 de la celda 1, por lo que si se asignase este grupo al RN3 de la celda 2 también se generaría interferencia co-layer entre ambos RNs. Aplicando procedimientos similares se escoge el segundo GrRB para los enlaces de acceso de cada RN (CS_rot_2GrRBs).

Para incrementar el reuso frecuencial se escoge el tercer GrRB para los enlaces de acceso de cada RN (CS_rot_3GrRBs). Si se continua con el análisis de los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1 como ejemplo de referencia, los GrRBs que aún quedan por elegir son los grupos B1 y B2. Se escoge el grupo B1, ya que este grupo solo está planificado para uno de los dos sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Aunque este grupo ya ha sido asignado a los dos RNs vecinos que también transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas B, que son el RN3 de la celda 2 y el RN3 de la celda 3, estos RNs se encuentran más alejados del RN0 de la celda 1, y por lo tanto la interferencia co-layer introducida por el reuso no es muy elevada.

Por último, se escoge el cuarto GrRB disponible para los enlaces de acceso de cada RN (CS_rot_4GrRBs). Con esta última asignación se incrementa el reuso frecuencial entre RNs vecinos, incrementando la interferencia co-layer generada. Sin embargo, como en este esquema de ICIC el objetivo ha sido separar lo máximo posible los RNs que transmiten sus enlaces de acceso de forma simultánea, el incremento en la interferencia co-layer es más leve que en los esquemas previos. Además, este incremento en la interferencia generada podría compensarse gracias a la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los RNs. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas basados en SFR, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

Aunque la selección de los GrRBs para los enlaces de acceso y backhaul se ha explicado tomando como ejemplo unos RNs concretos en la subtrama B, para la elección de los GrRBs en el resto de RNs, y para ambos tipos de subtramas, se han aplicado razonamientos similares a los explicados. Como se ha destacado antes, en los esquemas CS_rot_xGrRBs no existe la simetría que se ha visto en los esquemas de ICIC previos, debido a la rotación del patrón temporal de asignación de las subtramas de acceso y backhaul en la celda 1. Por ello se ha tratado de distribuir los GrRBs entre los diferentes RNs y enlaces de tal forma que se minimice la interferencia generada y se garanticen condiciones de interferencia lo más similares posibles para todos los RNs del sistema. También merece la pena destacar que el reparto de los recursos prioritarios para los DeNBs en el patrón de celda 3 de la subtrama A es el mismo que el propuesto para los esquemas CS_xGrRBs, y que por lo tanto está modificado respecto al reparto aplicado en los esquemas de RA basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional. El objetivo de esta modificación sigue siendo tratar de garantizar prestaciones lo más similares posibles en ambos tipos de subtramas.

De forma similar a los esquemas CS_xGrRBs, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular en ambos tipos de subtramas empeora las condiciones de interferencia sufridas por los mUEs respecto a las subtramas de acceso de los esquemas basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional, pero se mejoran respecto a las subtramas backhaul del esquema Back_op4. No obstante, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas aumentan la disponibilidad de RBs para los enlaces directos, pudiendo ofrecer mejores prestaciones a los mUEs. Respecto a la asignación de recursos para los enlaces backhaul se ha aplicado la misma filosofía que en el esquema Back_op4, y los GrRBs asignados a los enlaces backhaul son potencialmente asignados a los mUEs del sector opuesto al RN, minimizando la interferencia intra-celular.

4.5.4 Esquema basado en la estructura de combinación de tramas, considerando el despliegue de 4 RNs por sector: CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs

En la Figura 4.42 se representa el esquema de ICIC CS_xGrRBs basado en la estructura de combinación de tramas adaptado a la configuración de 4 RNs por sector. El objetivo de la estructura de combinación de tramas es facilitar el reuso frecuencial, tratando de proporcionar menores niveles de interferencia a los enlaces de acceso, así como permitir una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. Se han propuesto tres versiones, de tal forma que en la primera versión se asignan dos grupos de recursos a los enlaces de acceso de cada relay (CS_2GrRBs), en la segunda versión se incrementa a tres los GrRBs

asignados a cada relay (CS_3GrRBs), y finalmente, en la tercera versión se añade un cuarto GrRB (CS_4GrRBs), representándose qué grupo se escoge en primer lugar en la Figura 4.42.

En estos esquemas se aplica la ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que se representa en la Figura 4.42, de tal forma que los usuarios reciben asignaciones preferiblemente en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio, aunque realmente, todos los RBs reservados para los enlaces directos son accesibles. Sin embargo, con el objetivo de garantizar unas condiciones de canal estables y apropiadas para los enlaces backhaul, siempre se garantiza que cuando un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Además, continuando con la filosofía aplicada en los esquemas de RA previos, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Con el objetivo de facilitar el reparto de recursos entre los enlaces de acceso de los RNs no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

Continuando con la filosofía de los esquemas de ICIC propuestos previamente, para los enlaces de acceso de los RNs se evitan los GrRBs potencialmente asignados por su propio sector para los enlaces directos. Tal y como se representa en la Figura 4.42 todos los RBs del sistema están disponibles para los enlaces directos, planificando tres GrRBs para cada sector. Teniendo en cuenta además que el esquema está basado en la estructura de combinación de tramas, se disponen de seis GrRBs para distribuir entre los enlaces de acceso de dos RNs del sector y los enlaces backhaul de los dos RNs restantes del sector. Si se toma como referencia el sector A de la celda 1 para la subtrama A, se disponen de los grupos B1, B2, B3, C1, C2 y C3 para ser distribuidos entre los enlaces de acceso del RN0 y del RN2 y los enlaces backhaul del RN1 y del RN3. Alineado con la estrategia aplicada en los esquemas Back_op3 y Back_op4, cada GrRB asignado a los enlaces backhaul se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB, y con el objetivo de minimizar la interferencia intracelular, se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto. De esta forma, los GrRBs disponibles para el enlace backhaul del RN1 son los grupos B1, B2 y B3, mientras que para el enlace backhaul del RN3 los grupos disponibles son C1, C2 y C3.

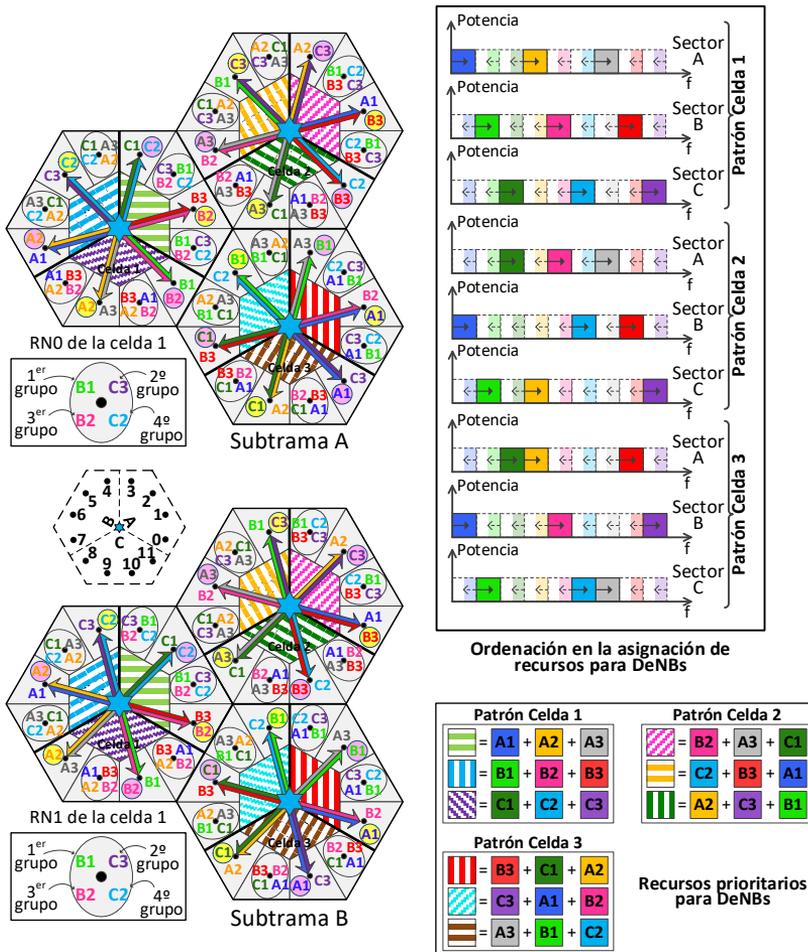


Figura 4.42: RA de los esquemas CS_2GrRBs, CS_3GrRBs y CS_4GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas A y B (4 RNs por sector)

Hay que tener en cuenta que, una vez que se asigne un GrRB a cada enlace backhaul, ya quedarán definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso, y los dos RNs pertenecientes al mismo sector tendrán que reutilizar los mismos cuatro grupos. Sin embargo, la capacidad obtenida por los enlaces backhaul asignando un único GrRB a cada RN puede no ser suficiente para satisfacer el throughput agregado de sus rUEs. Por ello, en la Figura 4.42 se representa un segundo GrRB asignado a cada enlace backhaul. No obstante, al asignar un segundo GrRB a cada enlace backhaul se reducirían a dos los grupos disponibles para los enlaces de acceso. Por ello, en la primera versión del esquema de ICIC, en la que se asignan dos GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN (CS_2GrRBs), es cuando los enlaces backhaul podrán ser asignados en los dos GrRBs planificados. Cuando se añade un tercer GrRB a los enlaces de

acceso de los RNs (CS_3GrRBs), el grupo representado con un círculo amarillo con línea discontinua deja de ser asignado al enlace backhaul, y pasa a ser el tercer GrRB asignado a los enlaces de acceso de los dos RNs de su sector. El enlace backhaul al que se le retira el GrRB completará sus asignaciones utilizando RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector. Se escogerán aquellos RBs en los que los mUEs del sector observan peores condiciones de interferencia, de tal forma que se proporcionan a los enlaces directos aquellos RBs con menores niveles de interferencia. Además, los RBs que se añadan a los enlaces backhaul provenientes de los enlaces directos continuarán con la estrategia de reutilizar los recursos asignados por el sector opuesto, de la misma forma que en los esquemas Back_op3 y Back_op4 propuestos para la configuración de 4 RNs por sector. Por último, cuando se añade el cuarto GrRB a los enlaces de acceso (CS_4GrRBs), el grupo representado con un círculo rosa con línea continua deja de ser asignado al enlace backhaul, y pasa a ser el cuarto GrRB asignado a los enlaces de acceso de los dos RNs de su sector. De nuevo, el enlace backhaul al que se le retira el GrRB completará sus asignaciones utilizando RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector.

Para decidir el reparto de los GrRBs disponibles entre los enlaces de acceso y enlaces backhaul de los RNs de cada sector se han analizado las condiciones de interferencia que observarían los rUEs de los diferentes RNs implicados. El objetivo del reparto de recursos es proporcionar a los enlaces de acceso de los RNs recursos en los que la interferencia cross-layer sea la menor posible, a la vez que se asignan GrRBs distintos a RNs vecinos siempre que es posible y tratando también de garantizar condiciones de interferencia similares para los enlaces de acceso de todos los RNs del sistema.

Si se analizan las condiciones de interferencia que sufrirían los rUEs del RN0 de la celda 1 teniendo en cuenta únicamente las asignaciones de los DeNBs para sus enlaces directos, se puede observar que el grupo C3 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2 y por el sector B de la celda 3, el grupo B1 es asignado potencialmente por el sector C de la celda 2, el grupo B2 es asignado potencialmente por el sector B de la celda 3, y por último los grupos C1, C2 y B3 no son potencialmente asignados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes. Como el grupo C3 es interferido por los dos sectores interferentes dominantes, podría plantearse utilizar este grupo para el enlace backhaul del RN3, y así no sería uno de los grupos planificados para los enlaces de acceso del RN0. Sin embargo, si se analiza también la interferencia que recibirían los rUEs del RN2, se observa que el grupo C3 no está planificado para los enlaces directos de los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes y, por lo tanto, la estrategia podría ser asignar este grupo a los enlaces de acceso del RN2 para aprovechar las buenas

condiciones de interferencia. Es importante tener en cuenta que los GrRBs que se asignen al enlace backhaul de un RN del sector, dejarán de estar disponibles para los enlaces de acceso de los dos RNs correspondientes del sector. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta las condiciones de interferencia de ambos RNs del sector para proponer un esquema de ICIC que garantice recursos frecuenciales con niveles interferentes similares para todos los RNs del sistema. Además, también es necesario tener en consideración que los GrRBs que se van planificando para los enlaces backhaul añaden interferencia cross-layer sobre los RNs de los DeNBs adyacentes que se encuentran transmitiendo sus enlaces de acceso, por lo que hay que tener en cuenta este impacto a la hora de seleccionar los recursos. Por último, para los enlaces backhaul se escogen los GrRBs que potencialmente serán asignados a los mUEs del sector opuesto, por lo tanto, considerando la configuración de 4 RNs por sector, los grupos disponibles para los enlaces backhaul son compartidos en parejas de 2 RNs. Por ejemplo, el RN3 y el RN5 tendrán que compartir para sus enlaces backhaul los tres GrRBs planificados para los enlaces directos del sector C, puesto que es su sector opuesto.

Teniendo en cuenta todas las implicaciones comentadas, y tomando como ejemplo el sector A de la celda 1 para la subtrama A, el primer GrRB que se planifica para el enlace backhaul del RN3 es el C1, a pesar de que este grupo no está planificado para los enlaces directos de los sectores interferentes dominantes, tanto de los enlaces de acceso del RN0 (sector C de la celda 2 y sector B de la celda 3), como de los enlaces de acceso del RN2 (sector B de la celda 2 y sector C de la celda 3). Aunque el grupo C1 ofrezca bajos niveles de interferencia cross-layer, esta elección permite garantizar condiciones homogéneas de interferencia para todos los RNs del sistema, y además podrá coordinarse con las siguientes elecciones de GrRBs para los enlaces backhaul restantes, reduciendo la interferencia cross-layer generada. Hay que tener en cuenta que al escoger el grupo C1 para el enlace backhaul del RN3, este grupo deja de estar disponible para el enlace backhaul del RN5, ya que este enlace backhaul también tiene que ser asignado en los GrRBs potencialmente asignados a los enlaces directos del sector C, que es el sector opuesto a ambos RNs. Aplicando el mismo planteamiento se escoge el primer GrRB para los enlaces backhaul del RN3, del RN7 y del RN11 de cada celda.

Como siguiente paso se escoge el primer GrRB para el enlace backhaul del RN1 de la celda 1. Los grupos disponibles para este enlace backhaul son el B2 y el B3, ya que el grupo B1 ya ha sido asignado al enlace backhaul del RN11. Teniendo en cuenta el GrRB ya asignado a los enlaces backhaul, los dos GrRBs disponibles son potencialmente asignados por uno de los dos sectores interferentes dominantes, tanto desde el punto de vista de los enlaces de acceso del RN0, como de los enlaces de acceso del RN1. En este caso los dos GrRBs

disponibles proporcionan de partida condiciones de interferencia similares y, de hecho, tanto si se escoge el grupo B2 como el B3 se llegan a soluciones homólogas. En el esquema propuesto se ha seleccionado el grupo B3. Siguiendo el mismo procedimiento se escoge el primer GrRB para los enlaces backhaul del RN1, del RN5 y del RN9 de cada celda. Estas elecciones también están coordinadas con los GrRBs ya seleccionados previamente para los enlaces backhaul, permitiendo minimizar la interferencia generada por las asignaciones de los enlaces backhaul sobre los enlaces de acceso. Por ejemplo, el grupo B3, que ha sido asignado al enlace backhaul del RN1 de la celda 1, ya había sido asignado al enlace backhaul del RN7 de la celda 3. El sector B de la celda 3 es uno de los sectores interferentes dominantes para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1, por lo tanto, asignando el grupo B3 al enlace backhaul del RN1 de la celda 1, el grupo deja de estar disponible para los enlaces de acceso del RN0 de la celda 1, minimizando la interferencia cross-layer sobre los enlaces de acceso. Además, estas últimas asignaciones a los enlaces backhaul también permiten garantizar condiciones homogéneas de interferencia para todos los RNs del sistema.

Una vez seleccionado un GrRB para cada enlace backhaul ya quedan definidos los cuatro GrRBs que serán planificados para los enlaces de acceso de los dos RNs de cada sector. No obstante, tal y como se ha adelantado es necesario considerar RBs adicionales para los enlaces backhaul, ya que asignando un único GrRB la capacidad del enlace backhaul puede no ser suficiente para satisfacer el throughput agregado de sus rUEs. Por lo tanto, se selecciona un segundo GrRB para los enlaces backhaul de cada RN, representado en la Figura 4.42 con un círculo amarillo con línea discontinua y con un círculo rosa con línea continua. Sin embargo, como los enlaces backhaul de los RNs utilizan los GrRBs potencialmente asignados a los enlaces directos de su sector opuesto, se dispone de tres GrRBs que son compartidos en parejas de 2 RNs, de los cuales dos de ellos ya han sido asignados. Así que el GrRB restante será compartido por cada pareja de RNs, asignando RBs diferentes a cada RN para respetar la restricción de que cada RB asignado a los enlaces backhaul se puede reutilizar un máximo de dos veces en el mismo DeNB.

Por lo tanto, los enlaces backhaul de todos los RNs se completan con el último GrRB disponible, representándose en la Figura 4.42 con un círculo amarillo con línea discontinua y con un círculo rosa con línea continua. Si por ejemplo nos centramos en el RN1 de la celda 1 de la subtrama A, a este RN se le asigna el grupo B2, que también es asignado al RN11 de su propia celda. Ambos RNs compartirán este GrRBs, y dentro de ese GrRB se asignarán RBs diferentes a los enlaces backhaul de cada RN. En línea con el resto de asignaciones para los enlaces backhaul, estas últimas asignaciones permiten la coordinación con los GrRBs ya seleccionados previamente para los enlaces backhaul, minimizando la

interferencia cross-layer generada sobre los enlaces de acceso. Además, se consigue garantizar condiciones homogéneas de interferencia para todos los RNs del sistema.

Una vez que han quedado definidos los cuatro GrRBs disponibles para los enlaces de acceso de cada RN nos centramos en terminar de decidir el orden en el que se escogen los grupos. El tercer y cuarto GrRB ya han quedado definidos tras la planificación de los GrRBs asignados a los enlaces backhaul, por lo que solo queda definir cuál de los dos GrRBs restantes sería asignado en primer lugar. Si se toman como ejemplo de referencia el RN0 y el RN2 de la celda 1 para la subtrama A, el tercer GrRB asignado a sus enlaces de acceso es el grupo B2, que deja de ser asignado al enlace backhaul del RN1 (representado con un círculo amarillo con línea discontinua). El cuarto GrRB asignado a sus enlaces de acceso es el grupo C2, que deja de ser asignado al enlace backhaul del RN3 (representado con un círculo rosa con línea continua). Por lo tanto, los dos primeros grupos asignados a los enlaces de acceso del RN0 y del RN2 son el B1 y el C3. Los dos GrRBs son potencialmente asignados por los dos sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes, tanto desde el punto de vista de los enlaces de acceso del RN0, como de los enlaces de acceso del RN2. Por lo tanto, los niveles de interferencia cross-layer son similares para ambos GrRBs y en ambos RNs. Además, cualquiera de los dos GrRBs permite planificar diferentes grupos a los principales RNs interferentes, minimizando la interferencia co-layer. Las dos alternativas posibles ofrecen condiciones de interferencia muy similares, así que se asigna el grupo B1 al RN0 y el grupo C3 al RN2.

Para incrementar la disponibilidad de recursos para los enlaces de acceso de los RNs se añade el segundo GrRB disponible (CS_2GrRBs). Con esta asignación, los dos RNs de cada sector que transmiten sus enlaces de acceso asignarán a sus rUEs en los mismos dos GrRBs. Sin embargo, el resto de los principales RNs interferentes utilizan GrRB diferentes, por lo que los niveles de interferencia co-layer no son excesivos.

Cuando se añade el tercer GrRB a los enlaces de acceso de cada RN (CS_3GrRBs), el grupo representado con un círculo amarillo con línea discontinua deja de ser asignado a los enlaces backhaul, y se añade a los enlaces de acceso de los dos RNs de cada sector. Por lo tanto, los dos RNs de cada sector utilizan los mismos tres GrRBs. Además, esta asignación también incrementa el reuso frecuencial con el resto de RNs vecinos, aumentando los niveles de interferencia co-layer sufridos por los enlaces de acceso. Por otro lado, los enlaces backhaul a los que se les quita un GrRB completarán sus asignaciones utilizando RBs inicialmente planificados para los enlaces directos, por lo que se reducen los RBs disponibles para los enlaces directos. No obstante, al quitar el

GrRB de uno de los enlaces backhaul de cada sector se reduce la interferencia cross-layer que reciben los enlaces de acceso. Concretamente se reduce la interferencia cross-layer recibida sobre el primer GrRB asignado a los enlaces de acceso de cada RN. Por ejemplo, para el caso del RN0 de la celda 1, el grupo B1 potencialmente deja de recibir interferencia del sector B de la celda 3, ya que el grupo B3 deja de ser asignado para el enlace backhaul del RN5 de la celda 3. Por lo tanto, será necesario comprobar si la mayor disponibilidad de recursos en los enlaces de acceso, junto con la disminución de la interferencia cross-layer, son capaces de compensar el incremento de los niveles de interferencia co-layer y la disminución de recursos en los enlaces directos.

Por último, se añade el cuarto GrRB a los enlaces de acceso de cada RN (CS_4GrRBs), de tal forma que el grupo representado con un círculo rosa con línea continua deja de ser asignado a los enlaces backhaul. Los dos RNs de cada sector asignarán a sus rUEs en los mismos cuatro GrRBs, y además esta asignación también incrementa los niveles de interferencia co-layer con el resto de RNs vecinos. Esta última asignación a los enlaces de acceso también conlleva una reducción de los recursos planificados para los enlaces directos, por lo que se tendrá que comprobar si el incremento de los recursos disponibles para los enlaces de acceso permite mejorar las prestaciones del sistema.

Las asignaciones de los GrRBs a los enlaces de acceso también han perseguido proporcionar recursos frecuenciales con similares condiciones de interferencia a todos los RNs del sistema. Continuando con la filosofía aplicada en los esquemas basados en SFR, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles. Si se comparan las condiciones de interferencia de los enlaces de acceso con el esquema SFR_xGrRBs, el esquema CS_xGrRBs, basado en la estructura de combinación de tramas, ofrece menores niveles de interferencia co-layer a los rUEs gracias a que no todos los RNs transmiten sus enlaces de acceso de forma simultánea, pero a costa de incrementar la interferencia cross-layer, debido a la asignación de los enlaces backhaul en ambos tipos de subtramas. No obstante, el esquema CS_xGrRBs proporciona una mayor disponibilidad de RBs para los enlaces directos que el esquema SFR_xGrRBs, pudiendo mejorar las prestaciones globales del sistema.

Aunque la explicación del esquema de ICIC se ha centrado en la subtrama A, en la Figura 4.42 puede observarse que el reparto de recursos entre los diferentes nodos y enlaces es idéntico en la subtrama B. Por ejemplo, en la subtrama B los GrRBs asignados a los enlaces de acceso del RN1 son los mismos que los asignados a los enlaces de acceso del RN0 en la subtrama A. Y del mismo modo, los GrRBs asignados al enlace backhaul del RN0 en la subtrama B son los mismos que los asignados al enlace backhaul del RN1 en la subtrama A. La interferencia proveniente de los DeNBs es muy similar para los

enlaces de acceso del RN0 en la subtrama A y para los enlaces de acceso del RN1 en la subtrama B, y esta situación es extensible al resto de RNs del sistema. Además, los principales RNs que se interfieren entre ellos son homólogos en ambos tipos de subtramas. Por lo tanto, aplicando el mismo procedimiento que se ha explicado a la subtrama B se llega al mismo reparto de recursos, pero teniendo en cuenta la rotación de los enlaces backhaul y de acceso entre las subtramas A y B. Las condiciones de interferencia son muy similares en ambos tipos de subtramas y, por lo tanto, no es necesario modificar el reparto de los recursos prioritarios para los DeNBs en el patrón de celda 3 de la subtrama A, como en el caso de la configuración de 2 RNs por sector.

De forma similar al esquema CS_xGrRBs propuesto para la configuración de 2 RNs por sector, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular en ambos tipos de subtramas empeora las condiciones de interferencia sufridas por los mUEs respecto a las subtramas de acceso de los esquemas basados en SFR propuestos para la estructura de trama convencional, pero se mejoran respecto a las subtramas backhaul del esquema Back_op4. No obstante, como el esquema CS_xGrRBs está basado en la estructura de combinación de tramas, la mayor disponibilidad de RBs para los enlaces directos puede mejorar las prestaciones de los mUEs. Respecto a la asignación de recursos para los enlaces backhaul se ha aplicado la misma filosofía que en el esquema Back_op4, y los GrRBs asignados a los enlaces backhaul son potencialmente asignados a los mUEs del sector opuesto al RN, minimizando la interferencia intra-celular.

4.5.5 Resultados

En este subapartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para los esquemas de ICIC y RA que se han propuesto basados en la estructura de combinación de tramas propuesta en la Figura 4.36. El objetivo de esta estructura es facilitar el reuso frecuencial, tratando de proporcionar menores niveles de interferencia a los enlaces de acceso, así como permitir una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. Para la evaluación de los esquemas de ICIC propuestos en este apartado se continúan empleando las mismas condiciones de simulación, explicadas en el subapartado 4.3.3.1 y quedando recogidos los parámetros generales de simulación en la Tabla 4.1. Además, en la Tabla 4.17 se incluyen los valores de las máscaras de potencia expresadas en dBm/RB para los esquemas de ICIC propuestos que se van a evaluar en este subapartado.

Esquema	$N_{total,int,c}$	$N_{total,ext,c}$	$N_{total,r}$	$M_{med,c}^{int}$	$M_{med,c}^{ext}$	$M_{med,r}$
2 RNs por sector						
CS_2GrRBs-Back(5 RBs)	42 / 42	0 / 0	6	26.77	0	29.22
CS_3GrRBs-Back(6 RBs)	45 / 45	0 / 0	9	26.47	0	27.46
CS_4GrRBs-Back(6 RBs)	45 / 45	0 / 0	12	26.47	0	26.21
CS_rot_2GrRBs-Back(5 RBs)	42 / 42	0 / 0	6	26.77	0	29.22
CS_rot_3GrRBs-Back(6 RBs)	45 / 45	0 / 0	9	26.47	0	27.46
CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs)	45 / 45	0 / 0	12	26.47	0	26.21
4 RNs por sector						
CS_2GrRBs-Back(4 RBs)	51 / 51	0 / 0	6	25.92	0	29.22
CS_3GrRBs-Back(4.5 RBs)	50 / 50	0 / 0	9	26.01	0	27.46
CS_4GrRBs-Back(4.5 RBs)	45 / 45	0 / 0	12	26.47	0	26.21

Tabla 4.17: Máscaras de potencia DeNBs y RNs para los esquemas de ICIC propuestos basados en la estructura de combinación de tramas [dBm/RB]

4.5.5.1 Esquemas basados en la estructura de combinación de tramas para la configuración de 2 RNs por sector

En los esquemas de ICIC basados en la estructura de combinación de tramas el throughput promedio global ($Thr_{avg,global}$) se calcula como se muestra en la ecuación (4.9). Se trata de un planteamiento similar al empleado para los esquemas basados en la estructura de trama convencional (ecuación (4.7)), pero adaptándolo a la estructura de combinación de tramas propuesta. De esta forma, $Thr_{avg,mUEs}^A$ y $Thr_{avg,mUEs}^B$ es el throughput promedio por celda obtenido por los mUEs en las subtramas A y B respectivamente, $Thr_{avg,rUEs}^A$ y $Thr_{avg,rUEs}^B$ es el throughput promedio por celda obtenido por los rUEs en las subtramas A y B respectivamente, y $Thr_{avg,RNs}^A$ y $Thr_{avg,RNs}^B$ es el throughput promedio por celda recibido por los enlaces backhaul de los RNs en las subtramas A y B respectivamente.

$$Thr_{avg,global} = Thr_{avg,mUEs}^A + Thr_{avg,mUEs}^B + \min(Thr_{avg,rUEs}^A + Thr_{avg,rUEs}^B, Thr_{avg,RNs}^A + Thr_{avg,RNs}^B) \quad (4.9)$$

En la Tabla 4.18 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas: CS_xGrRBs (Figura 4.38 y Figura 4.39) y CS_rot_xGrRBs (Figura 4.40 y Figura 4.41). Los resultados se han obtenido para la configuración de 2 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$, y aplicándose un bias de 4 dB. Si en primer lugar se analizan los resultados obtenidos para el esquema CS_xGrRBs, puede verse que

incrementar los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso de 2 a 3 GrRBs permite aumentar significativamente el throughput agregado de los rUEs, mejorando el throughput global de la red. Sin embargo, cuando se añade el cuarto GrRB a los enlaces de acceso, la ganancia en el throughput agregado de los rUEs es mínima. Esto se debe a que cuando se añade el cuarto GrRB la interferencia co-layer entre RNs vecinos se vuelve excesiva, y la mayor disponibilidad de recursos no es capaz de compensar el incremento de la interferencia. Respecto a los enlaces directos, el throughput agregado de los mUEs se reduce a medida que se incrementan los recursos planificados para los enlaces de acceso. El principal motivo es la reducción de los recursos disponibles para los enlaces directos cuando se incrementan los RBs planificados para los enlaces backhaul. No obstante, también puede observarse una ligera degradación debida a que un mayor número de UEs se conectan a los DeNBs, perteneciendo la mayor parte de ellos a las zonas exteriores de los DeNBs, y por lo tanto empleando MCSs más bajos.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama A			Subtrama B			Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	Backhaul	mUEs	rUEs	Backhaul	
CS_2GrRBs	6 / 5	4	5.34	3.03	3.55	5.37	3.02	3.55	16.76 (57.4%)
CS_3GrRBs	9 / 6	4	5.10	3.92	4.25	5.08	3.93	4.25	18.03 (69.3%)
CS_4GrRBs	12 / 6	4	5.04	3.95	4.25	5.03	3.98	4.25	18.00 (69.0%)
CS_rot_2GrRBs	6 / 5	4	5.33	3.12	3.55	5.34	3.16	3.55	16.95 (59.2%)
CS_rot_3GrRBs	9 / 6	4	5.07	3.91	4.25	5.15	4.01	4.25	18.14 (70.3%)
CS_rot_4GrRBs	12 / 6	4	5.02	3.98	4.25	5.08	4.16	4.25	18.24 (71.3%)

Tabla 4.18: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)

Si se analizan los resultados para las diferentes versiones del esquema CS_rot_xGrRBs, se pueden extraer conclusiones similares, obteniendo una ganancia significativa en el throughput global cuando se incrementan a tres los GrRBs planificados para los enlaces de acceso. No obstante, en el esquema CS_rot_xGrRBs, la interferencia co-layer no se incrementa tan significativamente cuando se añade el cuarto GrRB a los enlaces de acceso, proporcionando mejores condiciones de interferencia a los rUEs que en el esquema CS_4GrRBs, y obteniéndose una ligera ganancia a nivel del throughput global del sistema. Debido a la rotación del patrón temporal de la celda 1, el esquema CS_rot_xGrRBs no es simétrico, y como puede verse en la Tabla 4.18, y a pesar de que el diseño del esquema CS_rot_xGrRBs también persigue garantizar condiciones de interferencia similares a todos los RNs y a todos los sectores, el throughput agregado de los mUEs y de los rUEs no es el mismo en las subtramas A que en las subtramas B. Respecto a los enlaces de acceso, las

condiciones de interferencia observadas por los rUEs de los RNs que transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas B son mejores, que las condiciones de interferencia observadas por los rUEs de los RNs que transmiten sus enlaces de acceso en las subtramas A. Esta situación conlleva que el throughput agregado de los rUEs en las subtramas B sea ligeramente superior al throughput agregado de los rUEs en las subtramas A. Por el contrario, las condiciones de interferencia recibidas por los mUEs son mejores en las subtramas A que en las subtramas B. Sin embargo, el throughput agregado de los mUEs es inferior en las subtramas A. Esto se debe a que el scheduler temporal asigna más prioridad a los mUEs de la zona 0 en las subtramas B. Ya que, aunque las condiciones de interferencia sean peores, estos mUEs observan buenas condiciones de canal y pueden recibir MCSs más elevados. Por el contrario, como las condiciones de interferencia son mejores en las subtramas A, los mUEs de las zonas más exteriores de la celda (zonas 1 y 2) reciben más asignaciones en este tipo de subtrama, reduciendo el throughput agregado de los mUEs en las subtramas A. Esta situación es similar a la vista en la comparativa entre los esquemas FFR_2GrRBs y SFR_2GrRBs del subapartado 4.4.7.1.

Comparando los dos esquemas de ICIC basados en la estructura de combinación de tramas puede verse que el esquema CS_rot_xGrRBs proporciona un throughput global ligeramente superior. Gracias a la rotación del patrón temporal de la celda 1 propuesta en el esquema CS_rot_xGrRBs se consigue reducir los niveles de interferencia co-layer recibidos por los rUEs, al separar más los RNs que transmiten sus enlaces de acceso simultáneamente. Sin embargo, esa misma rotación del patrón temporal de la celda 1 complica en cierta medida la coordinación de los recursos que se planifican para los enlaces de acceso, con los recursos potencialmente empleados por los sectores interferentes de los DeNBs adyacentes, obteniéndose en algunos RNs niveles de interferencia cross-layer ligeramente superiores a los observados en el esquema CS_xGrRBs. Esto conlleva que la ganancia en el throughput agregado de los rUEs proporcionada por el esquema CS_rot_xGrRBs no sea tan significativa. Respecto a los enlaces directos, las condiciones de interferencia observadas por los mUEs son similares en ambos esquemas, obteniéndose un throughput agregado bastante similar. Finalmente, la capacidad de los enlaces backhaul es la misma en ambos esquemas, puesto que en ambos casos se ha continuado con la filosofía propuesta en el esquema Back_op4, y los RBs que son asignados a los enlaces backhaul solo pueden ser reutilizados por el sector opuesto del propio DeNB.

El objetivo de la estructura de combinación de tramas es facilitar el reúso frecuencial, tratando de proporcionar menores niveles de interferencia a los enlaces de acceso, así como permitir una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. Si se comparan los resultados obtenidos por los esquemas

basados en esta estructura (Tabla 4.18), frente a los resultados obtenidos por el esquema basado en SFR (Tabla 4.11), que es el esquema basado en la estructura de trama convencional que mejores resultados ofrece, puede verse que los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas incrementan el throughput global del sistema, llegando a alcanzar un 71% de ganancia respecto al throughput global proporcionado por una red macrocelular convencional. Respecto a los enlaces de acceso, aunque la estructura de combinación de tramas permite reducir la interferencia co-layer al reducir los RNs vecinos que se encuentran transmitiendo sus enlaces de acceso de forma simultánea, la interferencia cross-layer que reciben de los DeNBs es más alta debido a que los DeNBs incrementan su reuso frecuencial para asignar RBs a los enlaces backhaul en ambas subtramas. Esto conlleva que el throughput agregado de los rUEs sea más alto cuando se emplea el esquema basado en SFR, que cuando se emplean los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas. No obstante, merece la pena destacar que el esquema CS_rot_2GrRBs ofrece un throughput agregado de los rUEs más alto (6.28 Mbps) que en el caso del esquema SFR_2GrRBs (6.13 Mbps), debido a que en la elección de los dos primeros GrRBs del esquema CS_rot_2GrRBs pueden evitarse en gran medida los RBs que son potencialmente interferidos por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs adyacentes, y por lo tanto, la reducción en la interferencia co-layer es más significativa que el incremento en la interferencia cross-layer, proporcionando mejores condiciones de interferencia a los rUEs. Sin embargo, a medida que se aumentan los RBs planificados para los enlaces de acceso de los RNs, el incremento de la interferencia cross-layer se agrava, y los rUEs sufren mayores niveles de interferencia que los que son recibidos cuando se emplea el esquema basado en SFR.

En cuanto a los enlaces directos, como los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas asignan recursos frecuenciales a los enlaces backhaul en ambos tipos de subtramas, las condiciones de interferencia observadas por los mUEs se empeoran respecto a las subtramas de acceso del esquema basado en SFR, pero se mejoran respecto a las subtramas backhaul del esquema Back_op4. Gracias a que los enlaces backhaul son repartidos entre ambos tipos de subtramas, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permiten incrementar los recursos disponibles para los enlaces directos, incrementando el throughput agregado de los mUEs. Esta ganancia es la que permite a los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas mejorar el throughput global proporcionado por el esquema basado en SFR.

En la Figura 4.43 se compara la CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs). Cuando se emplean los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas se empeora ligeramente la CDF de los UEs

que reciben un throughput bajo, principalmente debido a dos motivos. El primero es que los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas proporcionan peores condiciones de interferencia a los rUEs. Este incremento en la interferencia afecta principalmente a los rUEs que observan malas condiciones de canal ya que son los más vulnerables, y son precisamente los rUEs que reciben un throughput bajo. El segundo motivo es que los mUEs que observan malas condiciones de canal también ven degradadas sus prestaciones. En los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas se mejoran las condiciones de interferencia de los enlaces directos en las subtramas backhaul, pero al mismo tiempo se empeoran en las subtramas de acceso. Por lo tanto, cuando se emplea el esquema basado en SFR, los mUEs que observan malas condiciones de canal tienen acceso a un mayor número de RBs con niveles de interferencia bajos en las subtramas de acceso, siendo capaces de recibir un throughput más alto. Por otro lado, la mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos obtenida por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permite mejorar la CDF de los UEs que reciben un throughput medio-alto.

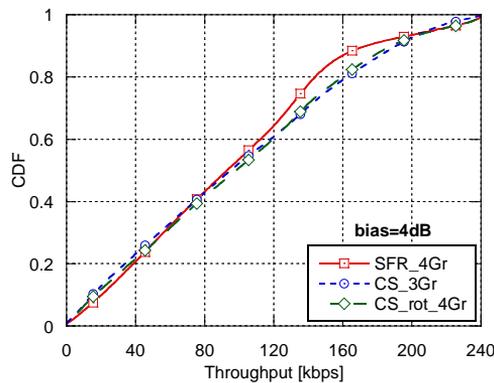


Figura 4.43: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs), para la configuración de 2 RNs por sector ($d = 2/3 \cdot R$)

En la Tabla 4.19 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas, pero desplegando los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$), y aplicando un bias de 4 dB al criterio de selección de nodo. Comparando los resultados obtenidos para las dos distancias de despliegue (d) consideradas, se extraen conclusiones similares a las explicadas para los esquemas basados en la estructura de trama convencional (esquemas basados en FFR y SFR). Cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 el throughput global del sistema se ve reducido, debido principalmente a que el throughput agregado de los rUEs es más bajo. Como los RNs se despliegan más lejos de los DeNBs,

se conectan a los RNs usuarios que se encuentran más alejados y que son más vulnerables a las interferencias, recibiendo sus asignaciones con MCSs más bajos y, por lo tanto, reduciendo el throughput agregado de los rUEs. Respecto a los enlaces directos, el throughput agregado de los mUEs es muy similar para ambas distancias de despliegue (d). Por último, la capacidad de los enlaces backhaul es la misma independientemente de la distancia a la que se despliegan los RNs, ya que, aunque los RNs se hayan desplegado más lejos del DeNB, la señal útil y la señal interferente dominante sufren la misma atenuación adicional, obteniéndose valores de SINR similares en ambos casos.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama A			Subtrama B			Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	Backhaul	mUEs	rUEs	Backhaul	
CS_2GrRBs	6 / 5	4	5.33	2.93	3.55	5.36	2.96	3.55	16.58 (55.7%)
CS_3GrRBs	9 / 6	4	5.08	3.81	4.25	5.06	3.77	4.25	17.72 (66.4%)
CS_4GrRBs	12 / 6	4	5.04	3.73	4.25	5.04	3.73	4.25	17.54 (64.7%)
CS_rot_2GrRBs	6 / 5	4	5.33	3.13	3.55	5.34	3.13	3.55	16.93 (59.0%)
CS_rot_3GrRBs	9 / 6	4	5.05	3.85	4.25	5.14	3.95	4.25	17.99 (68.9%)
CS_rot_4GrRBs	12 / 6	4	5.02	3.87	4.25	5.09	4.06	4.25	18.04 (69.4%)

Tabla 4.19: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$)

En la Tabla 4.20 se recoge el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas, para las dos distancias (d) consideradas, pero desglosando el throughput promedio obtenido para cada una de las zonas del DeNB. Cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, el throughput agregado de los UEs de la zona 2 se incrementa notablemente, gracias a que más UEs de esta zona se conectan a los RNs, y se ven beneficiados de mejores condiciones de canal. El esquema CS_rot_4GrRBs proporciona una ganancia de throughput en la zona 2 de casi el 112% comparado con el throughput logrado por la red macrocelular convencional en la misma zona. Sin embargo, como contrapartida, el throughput agregado de los UEs de las zonas 0 y 1 se reduce cuando los RNs se despliegan más hacia el exterior de la celda. La reducción se debe principalmente a que UEs que previamente se conectaban a los RNs, pasan a conectarse a los DeNBs, y aunque estos mUEs no observan malas condiciones de canal, puesto que pertenecen a las zonas 0 y 1, cuentan con menos RBs disponibles, recibiendo menos asignaciones de recursos, y obteniendo un throughput más bajo que cuando se conectaban a los RNs. Hay que tener en cuenta que cuando los RNs se despliegan a 2/3 del radio de la celda, estos mismos UEs, que están conectados a los RNs, se encuentran cerca de los RNs, recibiendo un throughput bastante elevado. Además de ello, los UEs de las zonas 0 y 1 que permanecen conectados

a los RNs cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, se encuentran más lejos de los RNs que les dan servicio, y por lo tanto emplean MCSs más bajos. Todo ello conlleva la reducción del throughput agregado de los UEs de las zonas 0 y 1 cuando los RNs se despliegan más hacia el exterior de la celda.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Global [Mbps]	Zona 0 [Mbps]	Zona 1 [Mbps]	Zona 2 [Mbps]
Los RNs se despliegan a 2/3 del radio de la celda respecto al DeNB ($d = 2/3 \cdot R$)						
CS_2GrRBs	6 / 5	4	16.76 (57.4%)	8.73 (70.2%)	5.06 (55.7%)	2.97 (30.8%)
CS_3GrRBs	9 / 6	4	18.03 (69.3%)	8.31 (62.0%)	6.34 (95.1%)	3.38 (48.9%)
CS_4GrRBs	12 / 6	4	18.00 (69.0%)	8.05 (56.9%)	6.64 (104.3%)	3.31 (45.8%)
CS_rot_2GrRBs	6 / 5	4	16.95 (59.2%)	8.63 (68.2%)	5.14 (58.2%)	3.18 (40.1%)
CS_rot_3GrRBs	9 / 6	4	18.14 (70.3%)	8.21 (60.0%)	6.38 (96.3%)	3.55 (56.4%)
CS_rot_4GrRBs	12 / 6	4	18.24 (71.3%)	7.95 (55.0%)	6.70 (106.2%)	3.59 (58.1%)
Los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)						
CS_2GrRBs	6 / 5	4	16.58 (55.7%)	8.32 (62.2%)	4.69 (44.3%)	3.57 (57.3%)
CS_3GrRBs	9 / 6	4	17.72 (66.4%)	7.82 (52.4%)	5.42 (66.8%)	4.48 (97.4%)
CS_4GrRBs	12 / 6	4	17.54 (64.7%)	7.56 (47.4%)	5.55 (70.8%)	4.43 (95.2%)
CS_rot_2GrRBs	6 / 5	4	16.93 (59.0%)	8.26 (61.0%)	4.76 (46.5%)	3.91 (72.2%)
CS_rot_3GrRBs	9 / 6	4	17.99 (68.9%)	7.76 (51.3%)	5.54 (70.5%)	4.69 (106.6%)
CS_rot_4GrRBs	12 / 6	4	18.04 (69.4%)	7.52 (46.6%)	5.71 (75.7%)	4.81 (111.9%)

Tabla 4.20: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (2 RNs por sector y $\theta_0 = 30^\circ$)

En la Figura 4.44 se representa la CDF del throughput recibido por los UEs de las diferentes zonas de la celda, para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs), para la configuración de 2 RNs por sector, cuando los RNs son desplegados en la frontera entre las zonas 1 y 2. La CDF del throughput de los UEs de la zona 2 (Figura 4.44(c)) es similar para los esquemas SFR_4GrRBs y CS_rot_4GrRBs para los UEs que reciben un throughput medio-alto, mientras que para los UEs que reciben un throughput bajo el esquema CS_rot_4GrRBs proporciona una CDF ligeramente peor. Esto se debe principalmente a que las condiciones de interferencia que reciben los rUEs son ligeramente peores para el esquema CS_rot_4GrRBs que para el esquema SFR_4GrRBs, y en la zona 2, la mayor parte de los UEs están conectados a los RNs. La CDF del throughput de los UEs de la zona 2 obtenida por el esquema CS_3GrRBs es la peor de las tres, pero esto se debe fundamentalmente a que como solo se asignan 3 GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN, la potencia de transmisión por RB de los RNs es

mayor, y se conectan a los RNs más UEs que en los otros dos esquemas, reduciéndose el throughput individual de los rUEs.

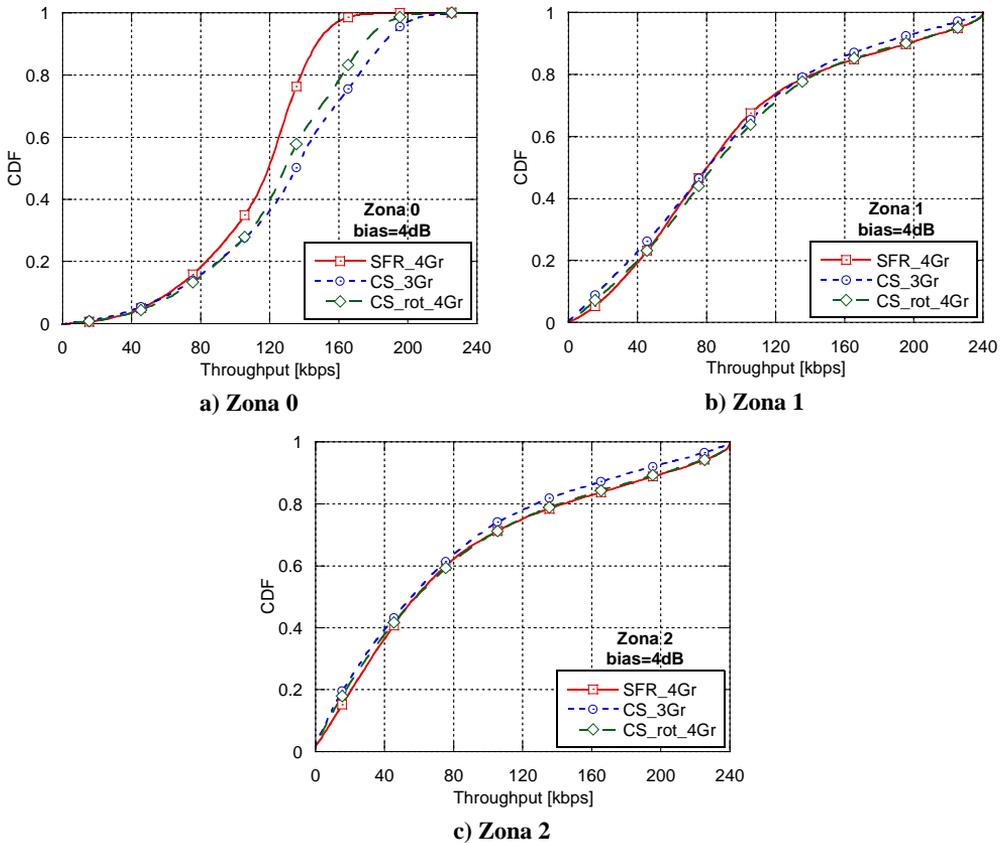


Figura 4.44: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_4GrRBs-Back_op4(6 RBs), CS_3GrRBs-Back(6 RBs) y CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs), para la configuración de 2 RNs por sector ($d \approx 0.76 \cdot R$)

Por otro lado, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permiten mejorar significativamente la CDF del throughput de los UEs de la zona 0 (Figura 4.44(a)), gracias al aumento de los RBs disponibles para los enlaces directos, ya que la gran mayoría de los UEs de la zona 0 se conectan a los DeNBs. Por lo tanto, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permiten mejorar notablemente la CDF del throughput de los UEs de la zona 0, empeorando solo ligeramente la CDF del throughput de los UEs de la zona 2, especialmente en el caso del esquema CS_rot_4GrRBs. Respecto a la zona 1, se conectan más UEs a los RNs que a los DeNBs, sin embargo, la diferencia no es tan grande como en la zona 2, y por ello, el comportamiento de la CDF del throughput de los UEs de la zona 1 (Figura 4.44(b)) es una mezcla

entre los comportamientos de la CDF de los UEs de la zona 0 y de la CDF de los UEs de la zona 2.

4.5.5.2 Esquema CS_xGrRBs para la configuración de 4 RNs por sector

En la Tabla 4.21 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) para el esquema basado en la estructura de combinación de tramas CS_xGrRBs (Figura 4.42) para la configuración de 4 RNs por sector, siendo $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$, y aplicándose un bias de 4 dB. Cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN es cuando se obtiene un throughput global más alto, alcanzando un 95% de ganancia respecto al throughput proporcionado por la red macrocelular convencional. Cuando se añade el tercer GrRB a los enlaces de acceso se incrementa la interferencia co-layer entre RNs vecinos, sin embargo, la mayor disponibilidad de recursos es capaz de compensar el incremento de la interferencia, ya que se obtiene un mayor throughput agregado de los rUEs. Sin embargo, a pesar de incrementar el throughput agregado de los rUEs, el throughput global empeora debido a que se reduce el throughput agregado de los mUEs, al reducir el número de RBs planificados para los enlaces directos. Por un lado, es necesario incrementar los RBs planificados para los enlaces backhaul para poder satisfacer el incremento del throughput agregado de los rUEs. Y por otro lado, cuando se añade el tercer GrRB a los enlaces de acceso, los GrRBs representados con un círculo amarillo con línea discontinua dejan de ser asignados a los enlaces backhaul y pasan a ser ese tercer GrRB asignado a los enlaces de acceso de los RNs de su sector. Por lo tanto, la reducción de los RBs disponibles para los enlaces directos es bastante significativa, y provoca que la reducción del throughput agregado de los mUEs sea mayor que el incremento del throughput agregado de los rUEs, obteniendo un throughput global más bajo que cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama A			Subtrama B			Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	Backhaul	mUEs	rUEs	Backhaul	
CS_2GrRBs	6 / 4	4	5.16	5.28	5.50	5.18	5.16	5.50	20.78 (95.1%)
CS_3GrRBs	9 / 4.5	4	4.28	5.88	6.19	4.34	5.85	6.19	20.35 (91.1%)
CS_4GrRBs	12 / 4.5	4	3.53	5.70	6.19	3.55	5.69	6.19	18.47 (73.4%)

Tabla 4.21: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $d = 2/3 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$)

Finalmente, cuando se añade el cuarto GrRB a los enlaces de acceso, el throughput global se reduce notablemente. A pesar de que no es necesario incrementar los RBs planificados para los enlaces backhaul, los grupos representados con un círculo rosa con línea continua dejan de ser asignados a los

enlaces backhaul, y pasan a ser el cuarto GrRB asignado a los enlaces de acceso de los RNs de su sector, reduciendo los RBs disponibles para los enlaces directos. Además, en este caso el throughput agregado de los rUEs no aumenta, sino que se degrada ligeramente. Hay que tener en cuenta que cuando se incrementan los RBs planificados para los enlaces de acceso, se reduce la potencia de transmisión por RB de los RNs, y los rUEs son más vulnerables a la interferencia. Además, también se incrementa la interferencia co-layer entre RNs vecinos. Todo ello conlleva que los valores de SINR observados por los rUEs sean más bajos, y que el aumento en la disponibilidad de recursos no sea suficiente para compensar la degradación en las prestaciones, obteniéndose un menor throughput agregado de los rUEs.

Si se comparan los resultados obtenidos para los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas para la configuración de 2 RNs por sector (Tabla 4.18), con los obtenidos para la configuración de 4 RNs por sector (Tabla 4.21), pueden extraerse conclusiones similares a las analizadas para los esquemas basados en la estructura de trama convencional. Y es que el despliegue de 4 RNs por sector incrementa el throughput global del sistema, gracias a que un mayor número de UEs se benefician de mejores condiciones de canal al conectarse a los RNs. Merece la pena tener en cuenta que cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 4 RNs por sector se alcanza el mismo reuso frecuencial, que cuando se asignan 4 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 2 RNs por sector. Sin embargo, si se comparan ambos casos, la configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, proporcionando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso, e incrementando notablemente el throughput agregado de los rUEs. Respecto a los enlaces backhaul, y tal y como se ha visto para los esquemas basados en la estructura de trama convencional, la capacidad promedio alcanzada por RB en la configuración de 4 RNs por sector es ligeramente inferior a la alcanzada en la configuración de 2 RNs por sector, debido a que los RNs están desplegados a diferentes ángulos respecto a la dirección de máxima radiación de la antena del sector que les da servicio.

Finalmente, comparando los resultados obtenidos por el esquema basado en la estructura de combinación de tramas (Tabla 4.21), con los obtenidos por el esquema basado en SFR (Tabla 4.14), considerando en ambos casos la configuración de 4 RNs por sector, se extraen conclusiones similares a las analizadas para la configuración de 2 RNs por sector. Respecto a los enlaces de acceso, de nuevo la estructura de combinación de tramas permite reducir la interferencia co-layer al reducir los RNs vecinos que se encuentran transmitiendo sus enlaces de acceso de forma simultánea. Sin embargo, la interferencia cross-layer que reciben de los DeNBs es más alta debido a que los DeNBs incrementan su reuso frecuencial para asignar RBs a los enlaces

backhaul en ambas subtramas, provocando que el throughput agregado de los rUEs sea más bajo cuando se emplea el esquema basado en la estructura de combinación de tramas que cuando se emplea el esquema basado en SFR. Por otro lado, gracias a que en el esquema CS_xGrRBs los enlaces backhaul se reparten entre ambos tipos de subtramas, se aumentan los recursos disponibles para los enlaces directos, mejorando significativamente el throughput agregado de los mUEs, y obteniendo un throughput global más alto que el esquema basado en SFR, llegando a alcanzar una mejora del 95% respecto a la red macrocelular convencional.

En la Figura 4.45 se compara la CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), cuando los RNs se despliegan a $2/3$ del radio de la celda. Puede observarse como el esquema CS_2GrRBs para la configuración de 4 RNs por sector permite mejorar la CDF del throughput de los UEs respecto al esquema CS_rot_4GrRBs para la configuración de 2 RNs por sector, gracias a que un mayor número de UEs se benefician de mejores condiciones de canal al conectarse a los RNs, y gracias también a que la configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, proporcionando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso. Si se comparan los resultados obtenidos por los esquemas CS_2GrRBs y SFR_2GrRBs para la configuración de 4 RNs por sector, puede observarse un compartimiento similar al analizado para la configuración de 2 RNs por sector (Figura 4.43). De tal forma que el esquema CS_2GrRBs empeora la CDF de los UEs que reciben un throughput bajo debido principalmente a dos motivos. El primero es que el esquema basado en la estructura de combinación de tramas proporciona peores condiciones de interferencia a los rUEs, reduciéndose principalmente el throughput de los rUEs que observan malas condiciones de canal, ya que son los más vulnerables al incremento de la interferencia. El segundo motivo es que cuando se emplea el esquema CS_2GrRBs los mUEs que observan malas condiciones de canal tienen acceso a un menor número de RBs con niveles de interferencia bajos, al repartir los enlaces backhaul entre ambos tipos de subtramas, viendo reducido su throughput. Por otro lado, la mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos alcanzada con el esquema CS_2GrRBs permite mejorar notablemente la CDF de los UEs que reciben un throughput medio-alto.

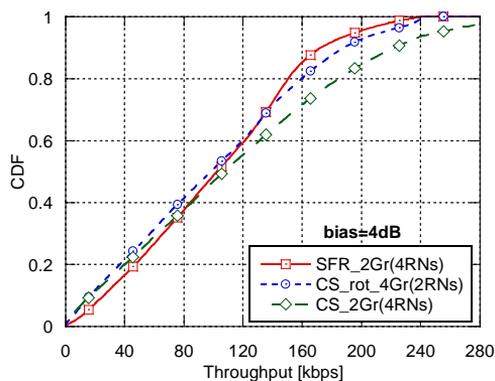


Figura 4.45: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), siendo $d = 2/3 \cdot R$

En la Tabla 4.22 se muestra el throughput promedio por celda (Mbps) obtenido por el esquema CS_xGrRBs para la configuración de 4 RNs por sector, pero desplegando los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_l = 45^\circ$), y aplicando un bias de 4 dB al criterio de selección de nodo. Comparando los resultados obtenidos para las dos distancias de despliegue (d) consideradas, se extraen conclusiones similares a las explicadas para los esquemas basados en la estructura de trama convencional. Cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 el throughput global de la red se reduce, debido principalmente a que el throughput agregado de los rUEs es más bajo, salvo en el caso del esquema CS_2GrRBs. Como los RNs se despliegan más lejos de los DeNBs, se conectan a los RNs usuarios que se encuentran más alejados y que son más vulnerables a la interferencia. Por ello la tendencia es que estos rUEs reciban sus asignaciones con MCSs más bajos, reduciéndose el throughput agregado de los rUEs. Sin embargo, en el caso concreto del esquema CS_2GrRBs, cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2, las condiciones de interferencia que observan los rUEs son mejores, obteniéndose un throughput agregado de los rUEs ligeramente más alto que cuando los RNs se despliegan a $2/3$ del radio de la celda. Por un lado, se mejoran los niveles de interferencia co-layer, ya que los principales RNs interferentes se encuentran más alejados cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. Por otro lado, al emplearse la estructura de combinación de tramas, los rUEs reciben un mayor nivel de interferencia cross-layer de su propio DeNB que en los esquemas basados en la estructura de trama convencional. Por lo que, al desplegar los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2, aunque aumentan los niveles de interferencia cross-layer provenientes de los DeNBs adyacentes, la interferencia cross-layer del propio DeNB se ve reducida, teniendo esta reducción más impacto en los esquemas basados en la estructura de combinación

de tramas, que en los basados en la estructura de trama convencional. Cuando se incrementan los RBs asignados a los enlaces de acceso, la interferencia co-layer es más similar para ambas distancias de despliegue y, además, los rUEs son más vulnerables a la interferencia, obteniéndose un throughput agregado de los rUEs ligeramente más bajo cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. Respecto a los enlaces directos, el throughput agregado de los mUEs es muy similar para ambas distancias de despliegue (d). Y por último, la capacidad de los enlaces backhaul es la misma, ya que, aunque los RNs se hayan desplegado más lejos del DeNB, la señal útil y la señal interferente dominante sufren la misma atenuación adicional, obteniéndose valores de SINR similares en ambos casos.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Subtrama A			Subtrama B			Global [Mbps]
			mUEs	rUEs	Backhaul	mUEs	rUEs	Backhaul	
CS_2GrRBs	6 / 4	4	5.14	5.37	5.50	5.16	5.21	5.50	20.88 (96.1%)
CS_3GrRBs	9 / 4.5	4	4.30	5.81	6.19	4.26	5.81	6.19	20.18 (89.5%)
CS_4GrRBs	12 / 4.5	4	3.52	5.64	6.19	3.58	5.63	6.19	18.37 (72.5%)

Tabla 4.22: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $d \approx 0.76 \cdot R$, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$)

En la Tabla 4.23 se recoge el throughput promedio por celda (Mbps) obtenido por el esquema basado en la estructura de combinación de tramas para la configuración de 4 RNs por sector, para las dos distancias (d) consideradas, pero desglosando el throughput promedio obtenido para cada una de las zonas del DeNB. De forma similar a como se ha analizado para los esquemas basados en la estructura de trama convencional, desplegando los RNs en la frontera entre las zonas 1 y 2 se consigue incrementar significativamente el throughput agregado de los UEs de la zona 2, gracias a que más usuarios de esta zona se conectan a los RNs. El esquema CS_3GrRBs permite proporcionar una ganancia de throughput en la zona 2 del 176% respecto al throughput logrado por la red macrocelular convencional en la misma zona. Sin embargo, cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 se reduce el throughput agregado de los UEs de las zonas 0 y 1, debido principalmente a que UEs que previamente se conectaban a los RNs, pasan a conectarse a los DeNBs, y aunque estos mUEs no observan malas condiciones de canal, cuentan con menos RBs disponibles, y reciben un throughput más bajo que cuando se conectaban a los RNs.

Esquema	RBs A/B	Bias [dB]	Global [Mbps]	Zona 0 [Mbps]	Zona 1 [Mbps]	Zona 2 [Mbps]
Los RNs se despliegan a 2/3 del radio de la celda respecto al DeNB ($d = 2/3 \cdot R$)						
CS_2GrRBs	6 / 4	4	20.78 (95.1%)	9.71 (89.3%)	7.36 (126.5%)	3.71 (63.4%)
CS_3GrRBs	9/4.5	4	20.35 (91.1%)	8.02 (56.3%)	8.38 (157.8%)	3.95 (74.0%)
CS_4GrRBs	12/4.5	4	18.47 (73.4%)	6.45 (25.7%)	8.28 (154.8%)	3.74 (64.8%)
Los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$)						
CS_2GrRBs	6 / 4	4	20.88 (96.1%)	9.10 (77.4%)	6.12 (88.3%)	5.66 (149.3%)
CS_3GrRBs	9/4.5	4	20.18 (89.5%)	7.33 (42.9%)	6.58 (102.5%)	6.27 (176.2%)
CS_4GrRBs	12/4.5	4	18.37 (72.5%)	5.91 (15.2%)	6.37 (96.0%)	6.09 (168.3%)

Tabla 4.23: Comparativa del throughput promedio por celda [Mbps] obtenido en las diferentes zonas por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas (4 RNs por sector, $\theta_0 = 15^\circ$ y $\theta_1 = 45^\circ$)

En la Figura 4.46 se representa la CDF del throughput recibido por los UEs de las diferentes zonas de la celda, para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), cuando los RNs son desplegados en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$). Comparando en primer lugar los resultados obtenidos por los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas para las dos configuraciones de despliegue, se obtienen conclusiones similares a las analizadas para los esquemas basados en la estructura de trama convencional. La configuración de 4 RNs por sector permite mejorar la CDF del throughput recibido por los mUEs gracias a que un mayor número de usuarios se conectan a los RNs. Además, la configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, proporcionando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso, y mejorando la CDF del throughput de los rUEs que observan un throughput promedio bajo. Por otro lado, como un mayor número de UEs se conectan a los RNs cuando se despliegan 4 RNs en cada sector, los rUEs reciben menos asignaciones de RBs, reduciéndose la CDF del throughput de los rUEs que reciben un throughput promedio medio-alto. Estos resultados de la CDF del throughput de mUEs y rUEs se han analizado en detalle para los esquemas basados en la estructura de trama convencional (Figura 4.31(b) y Figura 4.31(c)), y son los que marcan los resultados mostrados en la Figura 4.46 para las diferentes zonas de la celda. En las zonas 1 y 2 la mayor parte de los UEs se conectan a los RNs, por ello la configuración de 4 RNs por sector mejora las prestaciones de los UEs que reciben un throughput bajo-medio, a costa de empeorar las prestaciones de los UEs de ambas zonas que reciben un throughput alto. Por lo tanto, el despliegue de 4 RNs por sector permite ofrecer un mayor throughput agregado para los UEs de las zonas 1 y 2, y además también permite garantizar una CDF del throughput

más equitativa en las zonas exteriores de la celda. Respecto a la zona 0, como la mayor parte de los UEs se conectan a los DeNBs, la configuración de 4 RNs por sector mejora la CDF del throughput de los UEs que reciben un throughput promedio medio-alto.

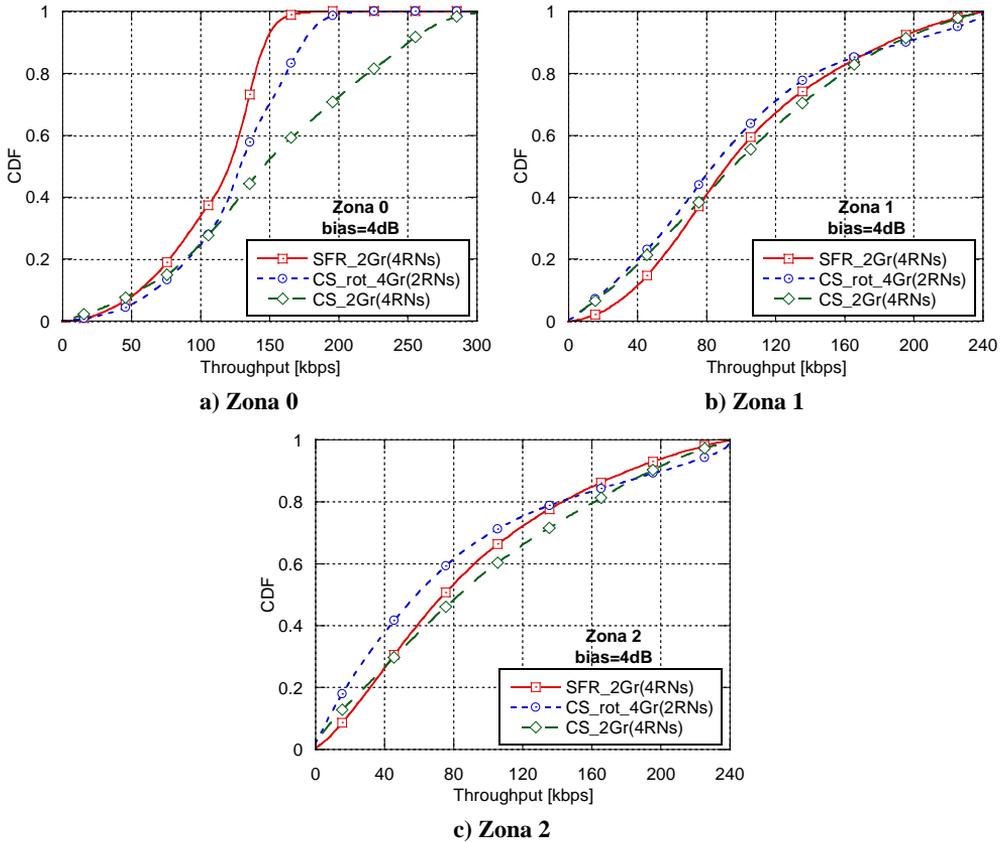


Figura 4.46: CDF del throughput recibido por los UEs para los esquemas SFR_2GrRBs-Back_op4(4 RBs) (4 RNs por sector), CS_rot_4GrRBs-Back(6 RBs) (2 RNs por sector) y CS_2GrRBs-Back(4 RBs) (4 RNs por sector), siendo $d \approx 0.76 \cdot R$

Finalmente, comparando los resultados obtenidos por el esquema basado en SFR, con los obtenidos por el esquema basado en la estructura de combinación de tramas, y considerando en ambos casos la configuración de 4 RNs por sector, se obtienen conclusiones similares a las analizadas para la configuración de 2 RNs por sector. En las zonas 1 y 2 la mayor parte de los UEs se conectan a los RNs, y el esquema CS_2GrRBs empeora la CDF del throughput de los UEs que reciben un throughput bajo, debido principalmente a que las condiciones de interferencia que reciben los rUEs son peores para el esquema CS_2GrRBs que para el esquema SFR_2GrRBs. Por otro lado, el esquema CS_2GrRBs permite mejorar la CDF del throughput de los UEs que reciben un throughput medio-

alto. Como el esquema CS_2GrRBs proporciona peores condiciones de interferencia a los rUEs, los rUEs que observan malas condiciones de canal acaban recibiendo menos asignaciones de RBs, ya que no siempre alcanzan niveles de SINR suficientes para recibir asignaciones con los MCSs más bajos. Por lo tanto, quedan más RBs libres que son asignados a los rUEs que observan mejores condiciones de canal, mejorando la CDF del throughput de los UEs que reciben un throughput medio-alto. Respecto a la zona 0, la mayor parte de los UEs se conectan a los DeNBs, y el esquema CS_2GrRBs mejora notablemente la CDF del throughput de los UEs gracias a que proporciona una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos. Por lo tanto, el esquema basado en la estructura de combinación de tramas permite mejorar significativamente la CDF del throughput de los UEs de la zona 0, a costa de proporcionar una CDF del throughput menos equitativa para los UEs de las zonas 1 y 2.

4.5.5.3 Conclusiones

En este apartado se han presentado los esquemas de ICIC propuestos para los despliegues RNs basados en la estructura de combinación de tramas. Para la configuración de 2 RNs por sector se han propuesto dos esquemas, CS_xGrRBs y CS_rot_xGrRBs, de los cuales, el esquema CS_rot_xGrRBs es el que proporciona un throughput global ligeramente superior. Gracias a la rotación del patrón temporal de la celda 1 propuesta en el esquema CS_rot_xGrRBs se reducen los niveles de interferencia co-layer recibidos por los rUEs, al separar todavía más los RNs que transmiten sus enlaces de acceso simultáneamente. No obstante, esta misma rotación del patrón temporal de la celda 1 complica la coordinación de los recursos que se planifican para los enlaces de acceso, con los recursos potencialmente empleados por los sectores interferentes de los DeNBs, empeorando los niveles de interferencia cross-layer. Por lo tanto, la ganancia en el throughput agregado de los rUEs, y en el throughput global del sistema, proporcionada por el esquema CS_rot_xGrRBs no es tan significativa.

En la Figura 4.47 se representa el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos más relevantes, representando de forma separada el throughput agregado de los mUEs y rUEs ($d = 2/3 \cdot R$). De forma similar a como se ha visto para los esquemas basados en la estructura de trama convencional, el despliegue de 4 RNs por sector permite incrementar el throughput global del sistema, gracias a que un mayor número de UEs se benefician de mejores condiciones de canal al conectarse a los RNs. Cuando se asignan 2 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 4 RNs por sector se alcanza el mismo reuso frecuencial, que cuando se asignan 4 GrRBs a los enlaces de acceso en la configuración de 2 RNs por sector, sin embargo, la

configuración de 4 RNs por sector permite gestionar mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, garantizando mejores niveles de SINR a los enlaces de acceso. Esta mejora permite alcanzar un 95% de ganancia en el throughput global por el esquema CS_2GrRBs, respecto al throughput global de la red macrocelular convencional.

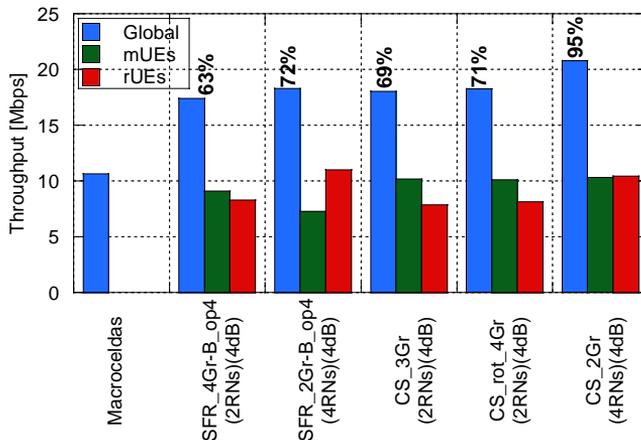


Figura 4.47: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes ($d = 2/3 \cdot R$)

Los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas son los que obtienen el mejor throughput global. Para la configuración de 2 RNs por sector permiten pasar del 63% de ganancia obtenida por el esquema SFR_4GrRBs al 71% de ganancia alcanzada por el esquema CS_rot_4GrRBs. Para la configuración de 4 RNs por sector la ganancia es mayor, pasando del 72% del esquema SFR_2GrRBs al 95% del esquema CS_2GrRBs. Gracias a que los enlaces backhaul son repartidos entre ambos tipos de subtramas, los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permiten incrementar los recursos disponibles para los enlaces directos, incrementando significativamente el throughput agregado de los mUEs, y permitiendo alcanzar un mayor throughput global. Esta ganancia es más relevante para la configuración de 4 RNs por sector, ya que en esta configuración se necesita planificar un mayor número de RBs para los enlaces backhaul, y al ser repartidos entre ambos tipos de subtramas se consigue un mayor incremento en la disponibilidad de recursos para los mUEs, llegando a asignar a los enlaces directos todos los recursos frecuenciales disponibles en el sistema en ambos tipos de subtrama con el esquema CS_2GrRBs. Respecto a los enlaces de acceso, aunque la estructura de combinación de tramas permite reducir la interferencia co-layer al reducir los RNs vecinos que se encuentran transmitiendo sus enlaces de acceso de forma simultánea, la interferencia cross-layer que reciben de los DeNBs es más alta debido a que los DeNBs incrementan su reuso frecuencial para asignar RBs a los

enlaces backhaul en ambas subtramas. Esto conlleva que el throughput agregado de los rUEs sea más bajo cuando se emplean los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas, que cuando se emplea el esquema basado en SFR.

Con el objetivo de potenciar que más UEs de la zona 2 se conecten a los RNs, y se beneficien de unas mejores condiciones de canal, también se han analizado los resultados cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2. En la Figura 4.48 se representa el throughput promedio por celda (Mbps) para los esquemas de ICIC propuestos más relevantes cuando los RNs se despliegan en la frontera entre las zonas 1 y 2 ($d \approx 0.76 \cdot R$). Además del throughput global, también se representa el throughput agregado para cada una de las tres zonas de la celda. Cuando los RNs se despliegan más hacia el exterior de la celda, en general el throughput global se ve reducido, pero se consigue una mejora muy significativa en el throughput agregado de los UEs de la zona 2, obteniéndose una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de la celda. Los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas permiten ofrecer un throughput agregado de los UEs de la zona 2 similar al proporcionado por el esquema basado en SFR, e incluso superior en el caso de la configuración de 4 RNs por sector, y además proporcionan un mayor throughput global.

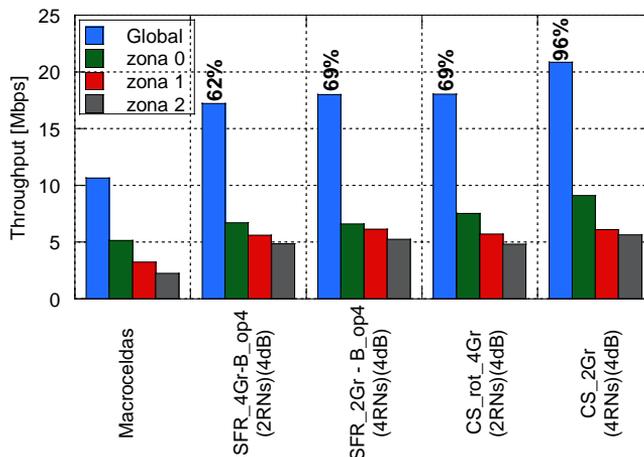


Figura 4.48: Throughput promedio por celda [Mbps] de los esquemas propuestos más relevantes, mostrando el throughput agregado por zona ($d \approx 0.76 \cdot R$)

La configuración de 4 RNs por sector, además de proporcionar un mayor throughput global, también ofrece un mayor throughput agregado de los UEs de la zona 2. Por lo tanto, esta configuración de despliegue es la que mejores resultados ofrece para ambas distancias de despliegue (d).

4.6 Conclusiones

En este capítulo se han propuesto y analizado diferentes esquemas de ICIC y RA para despliegues relays. Se ha visto que no todos los esquemas de ICIC permiten mejorar las prestaciones de las redes macrocelulares convencionales, debido al overhead introducido por los enlaces backhaul, que es un aspecto que pocas veces se ha tenido en cuenta en trabajos similares de la literatura. Sin embargo, planificando recursos frecuenciales prioritarios para cada sector de los DeNBs, y coordinando los recursos que son asignados por los DeNBs para sus mUEs, con los recursos empleados para dar soporte a la operativa de los RNs, el consumo extra de los despliegues RNs se puede compensar. De esta forma, aplicando un reuso frecuencial dentro del DeNB entre los diferentes enlaces, pero diseñando cuidadosamente los esquemas de ICIC, se pueden garantizar niveles adecuados de interferencia para los diferentes enlaces presentes en los despliegues relays, mejorando las prestaciones de las redes macrocelulares convencionales.

Desde el punto de vista de las subtramas de acceso, se han incrementado los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso, sin reducir los recursos planificados para los enlaces directos, de tal forma que todo el ancho de banda del sistema está disponible para los mUEs. Esto permite incrementar el reuso frecuencial, mejorando el throughput global del sistema. Por otro lado, desde el punto de vista de las subtramas backhaul también se ha conseguido incrementar el reuso frecuencial, aumentando notablemente la capacidad de los enlaces backhaul para poder satisfacer el elevado throughput agregado de los rUEs, al mismo tiempo que maximizando los recursos que son planificados para los mUEs para reducir el impacto del overhead de los enlaces backhaul sobre el throughput global del sistema.

De los esquemas propuestos basados en la estructura de trama convencional, son los esquemas basados en SFR los que ofrecen las mejores prestaciones, gracias a que se planifican para los enlaces de acceso de los RNs aquellos recursos frecuenciales que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs, minimizando la interferencia cross-layer e incrementando notablemente el throughput agregado de los rUEs. No obstante, son los esquemas basados en la estructura de combinación de tramas propuesta los que alcanzan los mejores resultados, gracias a que incrementan la disponibilidad de recursos para los enlaces directos al repartir la transmisión de los enlaces backhaul entre ambos tipos de subtramas. Como contrapartida, la interferencia cross-layer sufrida por los enlaces de acceso es más severa, reduciéndose el throughput agregado de los rUEs si se compara con el obtenido por los esquemas basados en SFR. Sin embargo, esta degradación es ligera, y el

incremento del throughput agregado de los mUEs es bastante más significativo, mejorando notablemente el throughput global del sistema.

También se ha analizado la aplicación del criterio CRE, con el objetivo de que un mayor número de UEs se conecten a los RNs, y se vean beneficiados de las ventajas que proporciona el despliegue de RNs. La aplicación del bias permite incrementar el throughput agregado de los rUEs, aumentando el throughput global del sistema. Esta ganancia es mayor a medida que se incrementan los recursos frecuenciales planificados para los enlaces de acceso, ya que un menor número de UEs se conectan a los RNs, y los rUEs adicionales se benefician de una mayor disponibilidad de recursos frecuenciales.

De las dos configuraciones de despliegue que se han empleado en este capítulo, la configuración de 4 RNs por sector es la que permite obtener mejores resultados. Cuando se despliegan 4 RNs en cada sector de los DeNBs un mayor número de UEs se conectan a los RNs y se benefician de observar mejores condiciones de canal al estar conectados a los RNs. Los resultados han mostrado que es más beneficioso desplegar un mayor número de RNs en los DeNBs, que incrementar excesivamente los recursos frecuenciales reutilizados por cada RN para sus enlaces de acceso, ya que la configuración de 4 RNs por sector gestiona mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, permitiendo aumentar el throughput agregado de los rUEs, e incrementando de esta forma el throughput global del sistema. La configuración de 4 RNs por sector permite proporcionar una ganancia en el throughput global del 72% respecto a una red macrocelular convencional cuando se emplea el esquema basado en SFR, y del 95% cuando se emplea el esquema basado en la estructura de combinación de tramas. Estos resultados muestran que el despliegue de RNs sobre la cobertura de redes macrocelulares convencionales permite mejorar significativamente las prestaciones del sistema, siempre y cuando se diseñen esquemas de ICIC y RA que permitan garantizar niveles de interferencia adecuados para todos los enlaces presentes en este tipo de despliegues.

Los UEs de las zonas exteriores de los DeNBs generalmente no observan buenas condiciones de canal debido a que se encuentran bastante alejados del nodo que les da servicio. En los resultados se ha visto que cuando se despliegan los RNs en la zona exterior de los DeNBs se reduce el throughput global del sistema, sin embargo, se mejora muy significativamente el throughput agregado de los UEs de la zona 2, gracias a que más UEs de esta zona se conectan a los RNs, beneficiándose de mejores condiciones de canal. Esto permite obtener una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de las celdas. La configuración de 4 RNs por sector permite alcanzar una ganancia en el throughput agregado de los UEs de la zona 2 del 131% respecto a una red macrocelular convencional cuando se emplea el esquema basado en SFR, y del

149% cuando se emplea el esquema basado en la estructura de combinación de tramas. Por lo tanto, el despliegue de relays en las zonas exteriores de las macroceldas permite mejorar las prestaciones de los UEs exteriores de manera muy significativa.

Capítulo 5

Despliegues Heterogéneos con Relays: Asignación Dinámica de Recursos y Criterio de Selección de Nodo

En el capítulo anterior se han propuesto y analizado varias estrategias estáticas de ICIC y RA para despliegues heterogéneos con RNs. No obstante, no es usual que en escenarios reales los usuarios se encuentren distribuidos de forma uniforme en las celdas. Y es que generalmente las redes móviles tienen que hacer frente a distribuciones heterogéneas de usuarios y, además, a variaciones de la distribución con el tiempo, debido a la movilidad de esos usuarios. Esta situación se complica todavía más, ya que cada usuario puede estar cursando diversos tipos de tráfico, con requisitos de QoS diferentes. Todo ello provoca una demanda de tráfico altamente heterogénea y variable a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la aplicación de esquemas de RA fijos limita la eficiencia de la red, ya que esta no puede adaptarse a las variaciones de la demanda. Para afrontar esta heterogeneidad y variabilidad en la demanda de tráfico es necesario diseñar estrategias dinámicas de ICIC y asignación de recursos, que vayan adaptando la distribución de recursos entre los diferentes nodos y enlaces. Además, y relacionado con esta asignación dinámica de recursos, también se requiere diseñar criterios de selección de nodo que sean capaces de operar bajo condiciones cambiantes de carga, para evitar que determinados nodos puedan llegar a sobrecargarse, y evitar de esta forma la fuerte degradación de prestaciones que sufrirían los usuarios servidos por estos nodos.

A continuación se presenta una revisión del estado del arte sobre diferentes estrategias dinámicas de gestión de recursos radio y coordinación de interferencias, así como diferentes criterios de selección de nodo, centrado todo ello en despliegues con relays. Posteriormente, y tomando como referencia las estrategias estáticas de gestión de recursos analizadas en el capítulo anterior, se propone un algoritmo que combina una distribución dinámica de recursos frecuenciales entre nodos y enlaces, que se adapta a distribuciones de demanda de tráfico heterogéneas y variables, y un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga para tratar de maximizar las prestaciones del sistema. Por último, se evalúan las prestaciones del algoritmo propuesto considerando escenarios con diferentes distribuciones de demanda de tráfico.

5.1 Estado del arte

En los capítulos anteriores se ha visto la importancia de adaptar los esquemas de ICIC convencionales a los nuevos escenarios interferentes introducidos por los despliegues heterogéneos. Por lo tanto, para hacer frente a condiciones de carga heterogéneas y cambiantes con el tiempo, el objetivo es adaptar dinámicamente el esquema de ICIC y RA, para ajustar los recursos frecuenciales que son asignados a cada nodo y a cada enlace. En la Figura 5.1 se representan de nuevo los esquemas partial FFR con subbanda exterior ortogonal (FFR) y soft FFR (SFR), junto con dos de las configuraciones de despliegue más típicas. En la literatura pueden encontrarse multitud de estrategias que abordan la problemática de realizar un reparto dinámico de recursos frecuenciales en despliegues heterogéneos con RNs desde diferentes ángulos, y en este apartado se presenta una revisión de algunas de las estrategias más representativas.

En [50] los autores emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando una única celda. Por lo tanto, no se considera un esquema de ICIC entre DeNBs, y el trabajo se centra en proponer un reparto dinámico de recursos entre los diferentes enlaces. En las subtramas backhaul, proponen un reparto ortogonal, de tal forma que cada RB solo puede ser asignado una vez en el DeNB, ya sea por los enlaces directos o por los enlaces backhaul. Los recursos frecuenciales de la red (N_{total}) se reparten de forma que la capacidad alcanzada por cada enlace sea proporcional a su demanda de tráfico, tal y como se expresa en la ecuación (5.1). $C_{directos}^{backhaul}$ y $C_{backhaul}$ son las capacidades que se alcanzarían en los enlaces directos y enlaces backhaul respectivamente en la subtrama backhaul, y se calculan mediante el producto entre el número de RBs asignados a cada tipo de enlace ($NRB_{directos}^{backhaul}$ y $NRB_{backhaul}$) y la eficiencia espectral observada en cada tipo de enlace ($\eta_{directos}^{backhaul}$ y $\eta_{backhaul}$). $D_{directos}$ y $D_{backhaul}$ son las demandas de tráfico de los enlaces directos y enlaces backhaul respectivamente,

que se calculan agregando las tasas requeridas de los UEs (T_{req}^u) conectados al DeNB (U_{DeNB}) y de los UEs conectados a los RNs (U_{RN_s}).

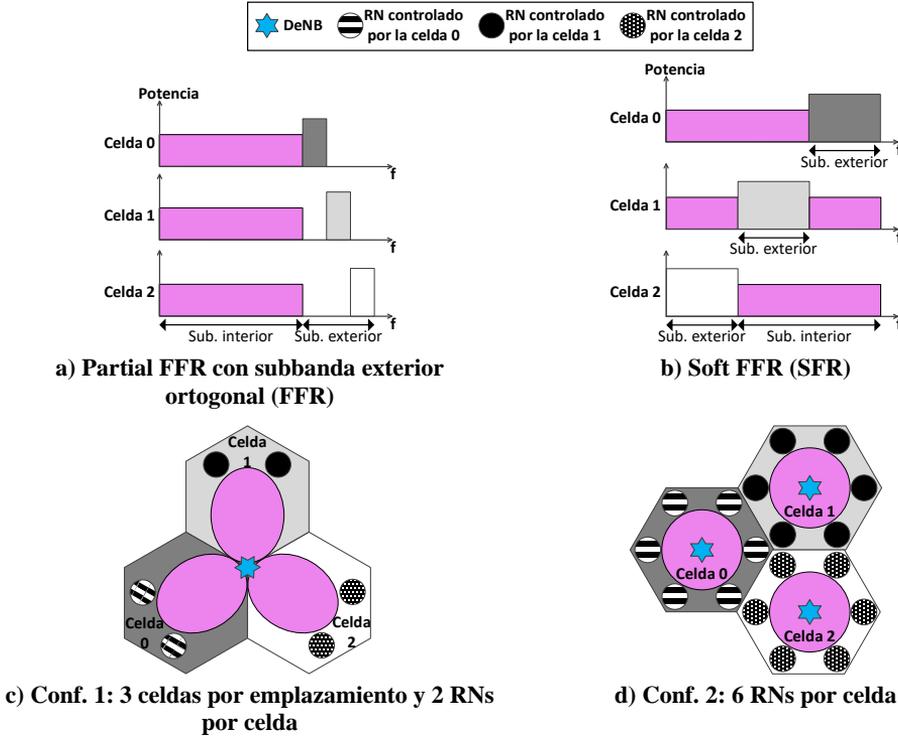


Figura 5.1: Esquemas FFR y SFR, junto con varias configuraciones de despliegue de RNs

Respecto a las subtramas de acceso, la propuesta considera que la capacidad de los enlaces de acceso sea la misma que la capacidad alcanzada por los enlaces backhaul en la subtrama anterior. Por lo tanto, de esta condición se derivan los RBs que serán asignados a los enlaces de acceso de los RNs, tal y como se refleja en la ecuación (5.2). C_{acceso} es la capacidad que se alcanzaría en los enlaces de acceso en la subtrama de acceso, y se calcula mediante el producto entre el número de RBs asignados a los enlaces de acceso (NRB_{acceso}) y la eficiencia espectral observada en estos enlaces (η_{acceso}). $NRB_{directos}^{acceso}$ representa el número de RBs asignados a los enlaces directos en la subtrama de acceso.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{backhaul}}{C_{directos}^{backhaul}} = \frac{D_{backhaul}}{D_{directos}} \rightarrow \frac{NRB_{backhaul} \cdot \eta_{backhaul}}{NRB_{directos}^{backhaul} \cdot \eta_{directos}^{backhaul}} = \frac{\sum_{\forall u \in U_{RN_s}} T_{req}^u}{\sum_{\forall u \in U_{DeNB}} T_{req}^u} \\ N_{total} = NRB_{directos}^{backhaul} + NRB_{backhaul} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} C_{\text{acceso}} = C_{\text{backhaul}} \rightarrow NRB_{\text{acceso}} \cdot \eta_{\text{acceso}} = NRB_{\text{backhaul}} \cdot \eta_{\text{backhaul}} \\ \text{Ortogonal: } N_{\text{total}} = NRB_{\text{directos}}^{\text{acceso}} + NRB_{\text{acceso}} \\ \text{Reúso: } NRB_{\text{directos}}^{\text{acceso}} = N_{\text{total}} \end{cases} \quad (5.2)$$

Los autores plantean dos estrategias de reúso frecuencial para las subtramas de acceso: reparto ortogonal y reúso de recursos. En el caso de aplicar un reparto ortogonal, cada RB solo puede ser asignado una vez en el DeNB, ya sea por los enlaces directos o por los enlaces de acceso. Sin embargo, al no considerar reúso frecuencial en ninguna de las dos subtramas, es difícil compensar el overhead introducido por las comunicaciones de dos saltos. Por el contrario, en la estrategia que considera reúso frecuencial, todos los RNs reutilizarán los mismos recursos frecuenciales (NRB_{acceso}), y además los enlaces directos pueden asignar todo el ancho de banda disponible. En este caso, la eficiencia espectral de los enlaces de acceso (η_{acceso}) refleja el hecho de que un mismo RB puede ser reutilizado por los seis RNs del DeNB. No obstante, que tanto los RNs como el DeNB reutilicen todos los recursos puede provocar fuertes niveles de interferencia, especialmente si se considera un despliegue más realista formado por más de un DeNB, ya que todos los RNs adyacentes usarían los mismos RBs.

La propuesta presentada en [51] se centra en un algoritmo para repartir los recursos frecuenciales en las subtramas backhaul. Se emplea la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero en lugar de desplegar seis RNs equidistantes por celda, se despliegan solo tres RNs en cada celda. Se emplea reúso unidad entre DeNBs vecinos, pero la propuesta no considera un esquema de ICIC que permita mejorar las condiciones de interferencia de la red, así como coordinar los recursos empleados por DeNBs y RNs. Proponen un reparto dinámico de recursos para las subtramas backhaul basándose en la cantidad de datos acumulados en los buffers de las conexiones, mientras que para las subtramas de acceso no realizan una propuesta específica. El algoritmo propuesto consta de dos fases, y a continuación se detallan los pasos que conforman la primera fase, que se llevan a cabo para todas las celdas de la red:

Paso 1: Como paso inicial, todos los RBs disponibles en el sistema se añaden al conjunto de RBs asignados a los enlaces directos del DeNB: v_c .

Paso 2: Para cada RN r del DeNB se calcula el cociente entre la capacidad que alcanzaría en su enlace backhaul este TTI con los RBs asignados hasta ahora ($C_{\text{backhaul},r}$) y la cantidad de datos acumulados en los buffers de las conexiones de sus rUEs en el DeNB (Q^u), tal y como se expresa en la ecuación (5.3). $T_{\text{alc,backhaul},r}^f$ es la tasa alcanzable por el RN r en su enlace backhaul en el RB f , v_r es el conjunto de RBs asignados al enlace backhaul del RN r y U_r es el conjunto de rUEs conectados al RN r .

$$\frac{C_{backhaul,r}}{\sum_{\forall u \in U_r} Q^u} = \frac{\sum_{\forall f \in v_r} T_{alc.backhaul,r}^f}{\sum_{\forall u \in U_r} Q^u} \quad (5.3)$$

Paso 3: Se escoge el RN r que obtiene un menor valor del cociente, y dentro del conjunto de RBs inicialmente asignados a los enlaces directos (v_c) se selecciona el RB f en el que el RN r observa las mejores condiciones. Por lo tanto, el RB f se elimina del conjunto v_c , y se añade al conjunto v_r . Se vuelve al paso 2 hasta que ya no quedan RBs en el conjunto v_c , o hasta que la tasa alcanzada por los enlaces backhaul de los RNs iguala la cantidad de datos acumulados en los buffers de las conexiones de sus rUEs.

Una vez finalizada la primera fase del algoritmo, se lleva a cabo la segunda fase para todas las celdas, siguiendo el diagrama representado en la Figura 5.2. U_{DeNB} es el conjunto de mUEs conectados al DeNB, $NRB_{backhaul,r}$ y $NRB_{directos}$ son el número de RBs actualmente asignados en este TTI al enlace backhaul del RN r y a los enlaces directos respectivamente. En la primera fase del algoritmo solo se tienen en cuenta los requisitos de las conexiones de los rUEs, priorizándose a aquellos RNs que tienen acumulada una mayor cantidad de datos en los buffers de su DeNB. Mientras que en la segunda fase también consideran los requisitos de las conexiones de los mUEs, pudiendo incrementar los recursos asignados a los enlaces directos si los buffers de las conexiones de los mUEs acumulan cierto retraso. Merece la pena resaltar que el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul es ortogonal.

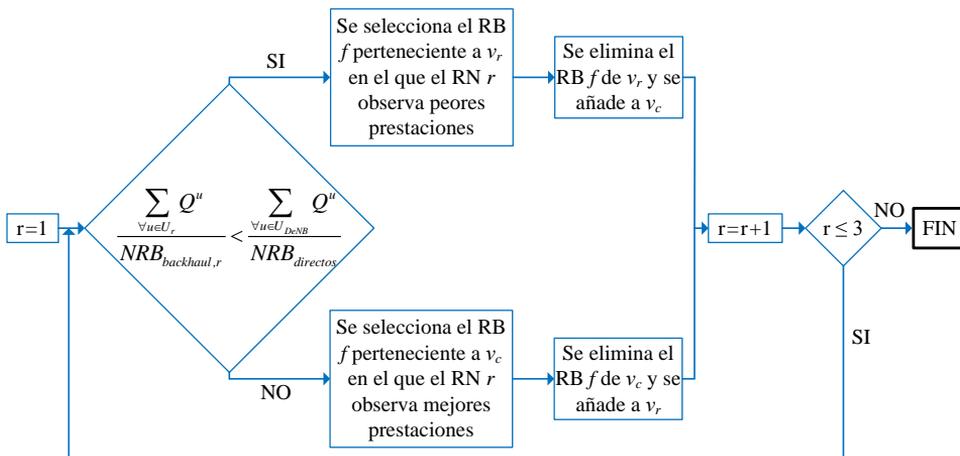


Figura 5.2: Diagrama de la segunda fase del algoritmo

En [52] consideran la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero en lugar de desplegar seis RNs equidistantes por celda, se despliegan solo tres RNs

en cada celda. Se considera reuso unidad entre DeNBs vecinos, pero no se aplica un esquema de ICIC. La propuesta se centra en un reparto dinámico de recursos en ambos tipos de subtramas, que se basa en el número de UEs conectados a cada nodo, junto con la tasa de datos promedio que es capaz de servir cada nodo a sus UEs. Plantean un reparto ortogonal entre todos los enlaces en ambos tipos de subtrama, de tal forma que cada RB solo puede ser asignado una vez en cada DeNB. Se comienza con las subtramas backhaul, y el número de RBs asignados a cada uno de los enlaces ($NRB_e^{backhaul}$) se calcula de forma proporcional a una prioridad ($prioridad_e$) siguiendo la ecuación (5.4). Para cada tipo de enlace, la prioridad se calcula como se expresa en la ecuación (5.5), donde NUE_r y NUE_d representan el número de UEs conectados al RN r y el número de UEs conectados al DeNB respectivamente, $\bar{T}_{serv,r}^{UE}$ es la tasa promedio servida a un rUE por su RN r , $\bar{T}_{serv,d}^{UE}$ es la tasa promedio servida a un mUE por su DeNB, y $\bar{T}_{serv,global}^{UE}$ es la tasa promedio servida a un UE considerando todo el sistema.

$$NRB_e^{backhaul} = \frac{prioridad_e}{\sum_{\forall e \in E} prioridad_e} \cdot N_{total} \quad (5.4)$$

$$\begin{cases} prioridad_{backhaul,r} = NUE_r \cdot \frac{\bar{T}_{serv,global}^{UE}}{\bar{T}_{serv,r}^{UE}} \\ prioridad_{directos} = NUE_d \cdot \frac{\bar{T}_{serv,global}^{UE}}{\bar{T}_{serv,d}^{UE}} \end{cases} \quad (5.5)$$

Los mismos RBs que son planificados para el enlace backhaul de un RN en la subtrama backhaul, son los que se planifican para sus enlaces de acceso en la siguiente subtrama de acceso. Por lo tanto, los RBs que se planifican para los enlaces directos en la subtrama backhaul también son los mismos que se planifican en la siguiente subtrama de acceso. La propuesta de reparto de recursos prioriza a aquellos nodos que sirven a una mayor cantidad de usuarios, y a aquellos nodos que están proporcionando una tasa de datos a sus UEs inferior a la tasa promedio servida a nivel de la red completa.

Las propuestas previas permiten adaptar dinámicamente los recursos frecuenciales asignados a los diferentes enlaces presentes en los despliegues heterogéneos con RNs, de tal forma que el sistema puede reaccionar a cambios en la distribución de la demanda de tráfico. Sin embargo, ninguna de las propuestas considera un esquema de ICIC, ni un esquema eficiente de reuso frecuencial, que permitirían mejorar las condiciones de interferencia de los usuarios, así como la eficiencia espectral de la red.

La propuesta presentada en [49] se basa en extender el algoritmo de scheduling PF a redes heterogéneas con RNs, de tal forma que el reparto de recursos frecuenciales entre los diferentes enlaces lo realiza directamente el scheduler. Emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando una única celda, por lo que la propuesta no tiene en cuenta un esquema de ICIC entre DeNBs. Consideran relays inband transparentes a los UEs (RNs “Tipo 2”), por lo que las decisiones de scheduling de los enlaces de acceso las toma el DeNB. Además, el scheduler del DeNB toma las decisiones de asignación de recursos de forma conjunta para una subtrama backhaul y la consecutiva subtrama de acceso. Se comienza asignando los recursos frecuenciales para la subtrama de acceso, en la que solo transmiten los RNs a sus rUEs, considerando un reparto de recursos ortogonal entre los diferentes enlaces de acceso. Para cada rUE u se obtiene su prioridad ($p_{acceso,u}^f$) para todos los RBs f empleando la métrica PF (5.6). $T_{alc,acceso,u}^f$ es la tasa de datos que el rUE u es capaz de alcanzar en su enlace de acceso en el RB f , \bar{T}_{serv}^u es el promedio de la tasa de datos servida al rUE u en las últimas subtramas, y U_{RNs} es el conjunto de UEs conectados a los RNs. El scheduler recorre todos los RBs y asigna cada RB f al rUE que tiene una mayor prioridad en dicho RB (5.7).

$$p_{acceso,u}^f = \frac{T_{alc,acceso,u}^f}{\bar{T}_{serv}^u}, \quad u \in U_{RNs} \quad (5.6)$$

$$u^*(f) = \arg \max_{u \in U_{RNs}} (p_{acceso,u}^f) \quad (5.7)$$

Una vez que se ha realizado la asignación de recursos frecuenciales en la subtrama de acceso, el scheduler se centra en la asignación de recursos para la subtrama backhaul predecesora. Los recursos serán compartidos entre los enlaces directos y los enlaces backhaul, considerándose un reparto ortogonal. No obstante, como la propuesta no aplica reuso frecuencial en ninguna de las dos subtramas, será difícil compensar el overhead introducido por las comunicaciones de dos saltos. En la ecuación (5.8) se expresa cómo se obtiene la prioridad para los mUEs ($p_{directo,u}^f$) y para los RNs ($p_{backhaul,r}^f$) en todos los RBs f . En el caso de los enlaces directos, la prioridad se calcula de la misma forma que en los enlaces de acceso, siendo $T_{alc,directo,u}^f$ la tasa de datos que el mUE u es capaz de alcanzar en su enlace de directo en el RB f , y U_{DeNB} el conjunto de UEs conectados al DeNB. Por otro lado, para los enlaces backhaul se añade un factor que multiplica la métrica PF, y que tiene como objetivo priorizar la asignación de recursos a los enlaces backhaul hasta que se obtiene la misma tasa de datos que se estima que se alcanzará en la posterior subtrama de acceso con las asignaciones de recursos realizadas a sus enlaces de acceso. $v_{acceso,r}$ es el conjunto

de RBs asignados a los enlaces de acceso del RN r , $v_{backhaul,r}$ es el conjunto de RBs que se han asignado hasta ahora al enlace backhaul del RN r , $T_{alc,acceso,r}^{f'}$ es la tasa alcanzable por el enlace de acceso del RN r en el RB f' , y $T_{alc,backhaul,r}^{f'}$ es la tasa alcanzable por el enlace backhaul del RN r en el RB f' . Además, para substituir la tasa de datos promedio servida al UE en la métrica PF utilizan la tasa promedio que el RN r está sirviendo a sus rUEs ($\bar{T}_{serv,r}^{UE}$). R es el conjunto de RNs desplegados en el DeNB. Una vez calculadas las prioridades para los mUEs y los enlaces backhaul de los RNs, el scheduler va recorriendo todos los RBs y cada RB es asignado al enlace que tiene mayor prioridad en dicho RB, ya sea un enlace directo, o un enlace backhaul (5.9). Merece la pena destacar, que cuando el enlace backhaul de un RN alcanza la tasa asignada a sus enlaces de acceso en la posterior subtrama de acceso, deja de ser considerado por el scheduler en los RBs restantes.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{directo,u}^f = \frac{T_{alc,directo,u}^f}{\bar{T}_{serv}^u}, \quad u \in U_{DeNB} \\ p_{backhaul,r}^f = \frac{\sum_{\forall f' \in v_{acceso,r}} T_{alc,acceso,r}^{f'}}{\sum_{\forall f' \in v_{backhaul,r}} T_{alc,backhaul,r}^{f'}} \cdot \frac{T_{alc,backhaul,r}^f}{\bar{T}_{serv,r}^{UE}}, \quad r \in R \end{array} \right. \quad (5.8)$$

$$u^*(f)/r^*(f) = \underset{\substack{u \in U_{DeNB} \\ r \in R}}{\text{arg max}} (p_{directo,u}^f \cdot p_{backhaul,r}^f) \quad (5.9)$$

La propuesta presentada en [53] es similar, extendiendo también el algoritmo de scheduling PF a redes heterogéneas con RNs. En este caso se emplea la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero en lugar de desplegar seis RNs equidistantes por celda, despliegan doce RNs en cada celda de forma aleatoria. Se emplea reuso unidad entre DeNBs vecinos, pero la propuesta no considera un esquema de ICIC que permita mejorar las condiciones de interferencia de la red. Una de las principales diferencias con la anterior propuesta es que en las subtramas de acceso proponen que todos los RNs y el DeNB reutilicen completamente todo el ancho de banda disponible en la red. No obstante, y teniendo además en cuenta que los RNs se despliegan de forma aleatoria, la interferencia generada puede ser bastante agresiva, reduciendo las prestaciones de los UEs. En la ecuación (5.10) se muestra cómo se obtienen las prioridades para cada RB f tanto para los mUEs ($p_{directo,u}^f$) como para los rUEs ($p_{acceso,u}^f$), siguiendo la métrica PF. El scheduler del DeNB y de los RNs irá recorriendo todos los RBs e irá asignando cada RB f al usuario que tiene una mayor prioridad en ese RB (5.11). U_r es el conjunto de UEs conectados al RN r .

$$\begin{cases} p_{directo,u}^f = \frac{T_{alc,directo,u}^f}{\bar{T}_{serv}^u}, & u \in U_{DeNB} \\ p_{acceso,u}^f = \frac{T_{alc,acceso,u}^f}{\bar{T}_{serv}^u}, & u \in U_{RNs} \end{cases} \quad (5.10)$$

$$\begin{cases} u^*(f) = \arg \max_{u \in U_{DeNB}} (p_{directo,u}^f) \\ u^*(f) = \arg \max_{u \in U_r} (p_{acceso,u}^f), \quad \forall r \in R \end{cases} \quad (5.11)$$

Respecto a las subtramas backhaul, el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul es ortogonal, y es el scheduler del DeNB el que decide ese reparto aplicando el algoritmo PF. Para calcular la prioridad de los enlaces backhaul proponen una alternativa diferente a la vista en [49], ya que en este caso obtienen una prioridad para cada rUE u de forma individual ($p_{backhaul,u}^f$), en lugar de calcular una prioridad global para el RN. Para calcular la prioridad de los rUEs, en lugar de utilizar directamente la tasa alcanzable en su enlace backhaul, proponen utilizar la media armónica ($\bar{T}_{alc,u}^f$) de las tasas alcanzables en el enlace backhaul ($T_{alc,backhaul,u}^f$) y en el enlace de acceso ($T_{alc,acceso,u}^f$), tal y como se representa en la ecuación (5.12). La media armónica se emplea con frecuencia para promediar tasas o velocidades, y de esta forma se está teniendo en cuenta la tasa de datos en ambos saltos. Por lo tanto, la prioridad de los rUEs para su enlace backhaul se calcula como aparece en la ecuación (5.13), y el scheduler del DeNB irá recorriendo todos los RBs, e irá asignando cada RB f al UE con mayor prioridad en dicho RB, ya sea un mUE (enlace directo) o un rUE (enlace backhaul) (5.14).

$$\bar{T}_{alc,u}^f = \left(\frac{1}{T_{alc,backhaul,u}^f} + \frac{1}{T_{alc,acceso,u}^f} \right)^{-1}, \quad u \in U_{RNs} \quad (5.12)$$

$$p_{backhaul,u}^f = \frac{\bar{T}_{alc,u}^f}{\bar{T}_{serv}^u}, \quad u \in U_{RNs} \quad (5.13)$$

$$u^*(f) = \arg \max_{\substack{u \in U_{DeNB} \\ u \in U_{RNs}}} (p_{directo,u}^f, p_{backhaul,u}^f) \quad (5.14)$$

En [54] se emplea la configuración de despliegue 1 (Figura 5.1(c)), y se considera reuso unidad entre DeNBs vecinos. Sin embargo, la propuesta no considera un esquema de ICIC entre DeNBs. En las subtramas de acceso

consideran que tanto el DeNB como los dos RNs reutilizan por completo todo el ancho de banda disponible en la red, por lo que las condiciones de interferencia sufridas por los UEs serán muy agresivas. Respecto a las subtramas backhaul, el reparto de recursos frecuenciales entre enlaces directos y enlaces backhaul es ortogonal, y es el scheduler del DeNB el que decide los RBs que son asignados a cada enlace. Los autores se centran en proponer una métrica de scheduling que tenga en cuenta diferentes parámetros relacionados con la QoS. Esta métrica será usada por el scheduler del DeNB y por el scheduler de los RNs, y además será usada tanto por la componente en el dominio temporal (TD), como por la componente en el dominio frecuencial (FD). De esta forma, el scheduler temporal utilizará la métrica para ordenar por prioridad a los UEs, y así proporcionar al scheduler frecuencial una lista reducida con los UEs que recibirán asignación en ese TTI. El scheduler temporal calcula la métrica para todos los UEs considerando todo el ancho de banda disponible en la red. Posteriormente, el scheduler frecuencial va recorriendo todos los RBs y cada RB f es asignado al UE u que tiene un mayor valor de la métrica en ese RB (M_u^f) (5.15).

$$M_u^f = m_{d,u} \cdot m_{p,u} \cdot m_{GBR,u} \cdot m_{PF,u}^f \quad (5.15)$$

La métrica propuesta está formada por diferentes términos que representan la influencia de los parámetros de QoS. $m_{d,u}$ es el término relacionado con el retardo de los paquetes de la conexión del UE u , y se calcula como se expresa en la ecuación (5.16), donde D_{max}^u es la cota máxima de retardo para el servicio cursado por el usuario y d_{HOL}^u es el retardo acumulado del paquete que se encuentra en la cabecera de los buffers de la conexión del usuario. α_d es el factor utilizado para controlar el impacto que tiene el término del retardo en la métrica global M_u^f . $m_{p,u}$ es el término relacionado con la prioridad del UE u (5.17). El valor de la prioridad (p_u) varía entre uno y nueve, de tal forma que cuanto mayor es su valor, menor es la prioridad del UE. α_p es el factor utilizado para controlar el impacto que tiene el término de la prioridad en la métrica global.

$$m_{d,u} = \left(100 \cdot \frac{d_{HOL}^u}{D_{max}^u} \right)^{\alpha_d} \quad (5.16)$$

$$m_{p,u} = (10 - p_u)^{\alpha_p} \quad (5.17)$$

El término relacionado con la satisfacción de la tasa de datos a garantizar ($m_{GBR,u}$) se calcula de acuerdo a la ecuación (5.18), donde $GBR_{TTI,u}$ es el requisito de tasa de datos a garantizar para el servicio cursado por el UE u calculado a nivel de TTI, y $\Delta_{GBR,u}(t)$ mide cuanto de lejos está el servicio de recibir su tasa de

datos garantizada en la subtrama t , y se calcula según la ecuación (5.19). $T_{serv}^u(t-1)$ es la tasa de datos servida al UE u en la anterior subtrama, y K y α_{GBR} son factores para controlar el impacto de este término $m_{GBR,u}$. Hay que tener en cuenta que para aquellos tráficos que no tengan una tasa de datos garantizada (GBR) se establece $m_{GBR,u} = 1$. Finalmente, $m_{PF,u}^f$ es la métrica PF y α_{PF} es el factor que permite controlar su impacto en la métrica global (5.20).

$$m_{GBR,u} = \max \left(1, K^{\alpha_{GBR}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta_{GBR,u}(t)}{GBR_{TTI,u}} \right) \right)^{\alpha_{GBR}} \quad (5.18)$$

$$\Delta_{GBR,u}(t) = \Delta_{GBR,u}(t-1) + GBR_{TTI,u} - T_{serv}^u(t-1) \quad (5.19)$$

$$m_{PF,u}^f = \left(\frac{T_{alc,u}^f}{T_{serv}^u} \right)^{\alpha_{PF}} \quad (5.20)$$

Por lo tanto, en las subtramas de acceso el DeNB y los dos RNs realizan el scheduling de forma independiente para los UEs a los que da servicio cada nodo. En las subtramas backhaul, el scheduler del DeNB repartirá los recursos frecuenciales entre enlaces directos y enlaces backhaul. La estrategia adoptada para calcular la métrica utilizada para los enlaces backhaul es similar a la empleada en [53], ya que se calcula para cada rUE de forma individual.

Las estrategias previas [49, 53, 54] se basan en el scheduling para realizar un reparto dinámico de recursos frecuenciales entre los diferentes enlaces. Sin embargo, como los recursos pueden ser asignados a distintos enlaces en TTIs consecutivos, la variabilidad de la interferencia es bastante alta, incrementándose los errores en la adaptación de la tasa. Además, ninguna de las propuestas considera un esquema de ICIC que permita mejorar las condiciones de interferencia, especialmente las de los UEs ubicados lejos del nodo que les da servicio. Por otro lado, no consideran un esquema de reuso frecuencial eficiente entre los diferentes enlaces, aplicando un reparto ortogonal en las subtramas backhaul, mientras que en las subtramas de acceso aplican o bien un reparto ortogonal que no permite compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul, o bien un reuso frecuencial total que provoca que las condiciones de interferencia sufridas por los UEs sean muy agresivas.

En [55] consideran la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando una única celda, y desplegando solo tres RNs equidistantes en lugar de seis. Por lo tanto, la propuesta no tiene en cuenta la ICI generada en escenarios de despliegue más realistas con múltiples celdas. En las subtramas backhaul consideran un reparto ortogonal entre enlaces directos y backhaul, de tal forma que cada RB solo puede ser asignado una vez en el DeNB. Respecto a

las subtramas de acceso, los RNs asignan sus enlaces de acceso en los mismos RBs en los que han recibido su enlace backhaul en la subtrama backhaul precedente. Por lo tanto, los enlaces de acceso de los tres RNs utilizan recursos frecuenciales ortogonales, sin embargo, el DeNB puede asignar todo el ancho de banda para sus enlaces directos, por lo que se permite reuso entre enlaces directos y enlaces de acceso. No obstante, y debido a la diferencia en la potencia de transmisión, los rUEs van a recibir fuertes niveles de interferencia cross-layer de su propio DeNB reduciendo sus prestaciones, especialmente para aquellos rUEs que no estén ubicados cerca de su RN.

Los autores definen un problema de optimización para la asignación de los recursos frecuenciales a los diferentes enlaces y para la asignación de potencia, que busca maximizar el throughput recibido por el UE que recibe el throughput más bajo de la red. Proponen el uso de varias técnicas para resolver el problema y encontrar una solución óptima local tras un número reducido de iteraciones. Este problema de asignación de recursos y potencia se resuelve de forma centralizada en el DeNB, y una vez que se ha realizado el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul en la subtrama backhaul, los recursos asignados a los enlaces de acceso en la siguiente subtrama de acceso ya quedan definidos. Por lo que, en las subtramas de acceso, el problema de optimización se centra en asignar los RBs disponibles en cada nodo a UEs concretos, ya que el reparto de recursos entre los diferentes enlaces ya ha sido definido.

En [56] abordan la problemática de la gestión de recursos radio en redes heterogéneas con RNs mediante la aplicación de técnicas de Machine Learning (ML). Emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando una única celda, y variando el número de RNs desplegados sobre ella. Por lo tanto, la propuesta no considera un esquema de ICIC entre DeNBs. La asignación de RBs a los diferentes enlaces se realiza de forma centralizada en el DeNB, y se lleva a cabo mediante la aplicación de un modelo de ML que toma como entradas los CQIs de los UEs y los RNs, y proporciona como salida la asignación de los RBs a los diferentes enlaces y UEs. El modelo de ML propuesto busca maximizar el valor de una función de utilidad, y lo aplican considerando tres funciones de utilidad diferentes. La primera función de utilidad considerada busca maximizar el throughput agregado de toda la red. La segunda función de utilidad busca maximizar la métrica PF en las asignaciones de recursos. Y la tercera función de utilidad es una combinación de las dos anteriores, de tal forma que en un TTI se trata de maximizar la métrica PF y en el siguiente TTI se trata de maximizar el throughput agregado de toda la red.

En las subtramas backhaul consideran un reparto ortogonal de recursos entre los diferentes enlaces, por lo que cada RB solo puede ser asignado una vez dentro del DeNB, y es el modelo de ML el que determina la cantidad de RBs

asignados a cada uno de los enlaces. Respecto a las subtramas de acceso, consideran que tanto el DeNB como todos los RNs pueden reutilizar completamente todo el ancho de banda disponible en la red, por lo que el modelo de ML realizará las asignaciones de recursos de todos los nodos, teniendo en cuenta los UEs conectados a cada uno de ellos.

Las propuestas presentadas en [55, 56] consideran un reparto y una asignación de recursos centralizados en el DeNB. No obstante, desde el punto de vista de incrementar la capacidad de la red, el despliegue de RNs “Tipo 1” es más interesante, ya que pueden tomar las decisiones de scheduling de sus enlaces de acceso, alcanzando una adaptación del enlace más eficiente. Por otro lado, consideran un despliegue de red simplificado formado por una única celda. Sin embargo, ya se ha visto que es necesario tener en cuenta la ICI generada en redes celulares, ya que su gestión tiene un fuerte impacto en las prestaciones de los UEs. Además, sería necesario analizar el compromiso entre la ganancia proporcionada por este tipo de propuestas más complejas computacionalmente, y el incremento de coste asociado al considerar DeNBs con mayor potencia de cálculo.

En las propuestas previas no se considera un esquema de ICIC entre DeNBs. Sin embargo, en los capítulos anteriores se ha visto su importancia para mejorar las condiciones de interferencia sufridas por los UEs, así como para permitir una coordinación entre los recursos utilizados por los DeNBs, y los recursos utilizados por los nodos de baja potencia. En [57] consideran la configuración de despliegue 1 (Figura 5.1(c)), sobre la que aplican el esquema FFR (Figura 5.1(a)). Consideran RNs full-duplex “Tipo 1b” capaces de transmitir sus enlaces de acceso y recibir su enlace backhaul de forma simultánea en la misma banda frecuencial, empleando sistemas de antenas complejos que proporcionan un aislamiento adecuado. Proponen que la subbanda interior de recursos sea compartida por los enlaces directos y los enlaces backhaul, mientras que la subbanda exterior se reserva para los enlaces de acceso. Los dos RNs de cada celda comparten los recursos de la subbanda exterior de su celda, realizándose un reparto ortogonal entre los enlaces de acceso de ambos RNs. Además, como los RNs adyacentes de las celdas vecinas asignan a sus rUEs en recursos frecuenciales ortogonales, se garantizan buenas condiciones de interferencia a los rUEs. Sin embargo, el bajo reúso frecuencial entre enlaces de acceso puede comprometer las prestaciones globales de la red debido al overhead introducido por los enlaces backhaul.

Los autores proponen ajustar dinámicamente el tamaño de las subbandas exteriores para adaptarse a condiciones cambiantes de la distribución de UEs. Cada celda c calcula el promedio de RBs disponibles en el enlace de acceso para cada rUE (m_c) mediante la ecuación (5.21), donde $NRB_{acceso,c}$ es el número de

RBs asignados a los enlaces de acceso de los RNs de la celda c y $NrUE_c$ es el número de UEs conectados a los RNs de la celda c . El ajuste busca que este promedio sea lo más similar posible entre las celdas adyacentes para proporcionar prestaciones similares a todos los rUEs de la red, y se lleva a cabo cada subtrama. Para ello, cada celda obtiene su promedio m_c y lo compara con el promedio de las celdas adyacentes ($\bar{m}_{c'}$) tal y como se expresa en la ecuación (5.22). Si su promedio de RBs es mayor que el de las celdas adyacentes, se calculan los RBs a liberar por la celda c ($NRB_{libres,c}$) y se descuentan de los RBs asignados a sus enlaces de acceso ($NRB_{acceso,c}$). Por el contrario, si su promedio es menor que el de las celdas adyacentes, se intenta incrementar el número de RBs asignados a sus enlaces de acceso. Pero para ello es necesario que todas las celdas adyacentes hayan liberado RBs comunes ($NRB_{libres,c'}$), para que este incremento de RBs en la celda c no introduzca interferencia co-layer entre los RNs de las celdas adyacentes.

$$m_c = \frac{NRB_{acceso,c}}{NrUE_c} \quad (5.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } m_c > \bar{m}_{c'} : \\ \quad NRB_{libres,c} = \lceil NrUE_c \cdot (m_c - \bar{m}_{c'}) \rceil \\ \quad NRB_{acceso,c} = NRB_{acceso,c} - NRB_{libres,c} \\ \text{Si } m_c < \bar{m}_{c'} : \\ \quad NRB_{acceso,c} = NRB_{acceso,c} + \min(\lceil NrUE_c \cdot (\bar{m}_{c'} - m_c) \rceil, NRB_{libres,c'}) \end{array} \right. \quad (5.22)$$

Esta propuesta de reparto dinámico de los recursos frecuenciales permite adaptarse a cambios en la distribución de los UEs en las zonas exteriores de las celdas, que son los UEs que potencialmente estarán conectados a los RNs. Sin embargo, la subbanda interior, que es compartida por los enlaces directos y los enlaces backhaul, no se ajusta de forma dinámica, por lo que la red no puede adaptarse a cambios en la distribución de los UEs de las zonas interiores de las celdas. En [58] los autores emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero desplegando solo tres RNs equidistantes en cada celda en lugar de seis. Emplean el esquema FFR (Figura 5.1(a)), y se centran en proponer un ajuste dinámico del tamaño de las subbandas interior y exterior para las subtramas de acceso. Este ajuste se realiza de forma centralizada en una de las celdas de la red, y todas las celdas aplican el mismo reparto de recursos entre subbandas. Por el contrario, no realizan una propuesta específica para las subtramas backhaul. Realizan una clasificación de los UEs en interiores y exteriores en función de la SINR recibida del DeNB, de tal forma que los UEs

interiores son servidos por el DeNB, y los UEs exteriores pueden ser servidos por el DeNB o por los RNs.

El reparto de recursos entre subbanda interior y exterior se realiza de forma proporcional a los UEs que se encuentran en cada una de las zonas, tal y como se expresa en la ecuación (5.23). $NUE_{ext,c}$ es el número de UEs ubicados en la zona exterior de la celda c , incluyendo tanto mUEs como rUEs, $NUE_{int,c}$ es el número de UEs ubicados en la zona interior de la celda c , NRB_{ext} es el número de RBs asignados a la subbanda exterior y NRB_{int} es el número de RBs asignados a la subbanda interior. Tal y como se refleja en la ecuación (5.24), una vez que se descuentan los RBs asignados a la subbanda interior del total de recursos disponibles en la red (N_{total}), los recursos frecuenciales restantes se dividen en tres partes, siendo cada una de estas partes los recursos asignados a la subbanda exterior de cada uno de los patrones de celda del esquema FFR (NRB_{ext}). Finalmente, de las ecuaciones (5.23) y (5.24) se deriva la ecuación (5.25), que permite obtener los RBs asignados a la subbanda interior (NRB_{int}).

$$\alpha = \frac{\sum_{\forall c} NUE_{ext,c}}{\sum_{\forall c} NUE_{int,c}} = \frac{NRB_{ext}}{NRB_{int}} \quad (5.23)$$

$$NRB_{ext} = \frac{N_{total} - NRB_{int}}{3} \quad (5.24)$$

$$NRB_{int} = \frac{N_{total}}{3 \cdot \alpha + 1} \quad (5.25)$$

Una vez que se han calculado los RBs asignados a cada una de las subbandas de recursos, la subbanda exterior se subdivide en cuatro partes, de tal forma que una de ellas es asignada a los mUEs del exterior de la celda, mientras que las tres partes restantes se reparten entre los tres RNs desplegados en cada celda, asignando una parte a cada RN. Este reparto de la subbanda exterior también se realiza de forma proporcional al número de UEs, tal y como se expresa en la ecuación (5.26), donde $NRB_{acceso,r}$ es el número de RBs que se asignan a los enlaces de acceso del RN r , $NRB_{directos}$ es el número de RBs asignados a los enlaces directos teniendo en cuenta ambas subbandas, $NrUE_{r,c}$ es el número de UEs conectados al RN r de la celda c , y $NmUE_{ext,c}$ es el número de UEs exteriores conectados al DeNB en la celda c . Gracias a que los enlaces de acceso de los RNs utilizan la subbanda exterior de recursos del esquema FFR, y a que los enlaces de acceso de los RNs pertenecientes a la misma celda son ortogonales, las condiciones de interferencia observadas por los rUEs serán realmente buenas. Sin embargo, como ya se ha visto, incrementar el reuso

frecuencial entre los enlaces de acceso permite compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul e incrementar las prestaciones de la red.

$$\left\{ \begin{array}{l} NRB_{acceso,r} = \frac{\sum_{\forall c} NrUE_{r,c}}{\sum_{\forall c} NUE_{ext,c}} \cdot NRB_{ext} \\ NRB_{directos} = NRB_{int} + \frac{\sum_{\forall c} NmUE_{ext,c}}{\sum_{\forall c} NUE_{ext,c}} \cdot NRB_{ext} \end{array} \right. \quad (5.26)$$

En [59] emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando celdas trisectorizadas y desplegando tres RNs en cada uno de los sectores. Los autores se centran en proponer un esquema de reparto de recursos dinámico para las subtramas de acceso, mientras que para las subtramas backhaul consideran a los RNs como “usuarios” adicionales y no proponen una estrategia específica. Tal y como se representa en la Figura 5.3 el ancho de banda del sistema se divide en cuatro subbandas: A, B, C y D. La subbanda A se reserva para los enlaces directos, y puede ser reutilizada por completo en los tres sectores de cada celda. Las tres subbandas restantes se asignan a los enlaces de acceso de los RNs de cada uno de los tres sectores, de tal forma que, por ejemplo, los RNs del sector α comparten la subbanda B. Finalmente, para alcanzar un reuso frecuencial unidad a nivel de sector, los enlaces directos de cada sector pueden utilizar las dos subbandas restantes que no son asignadas por los RNs del sector. Por ejemplo, el sector α también podrá asignar recursos a sus enlaces directos en las subbandas C y D. La propuesta contempla adaptar el tamaño de cada una de las subbandas basándose en la demanda de tráfico de los diferentes nodos.

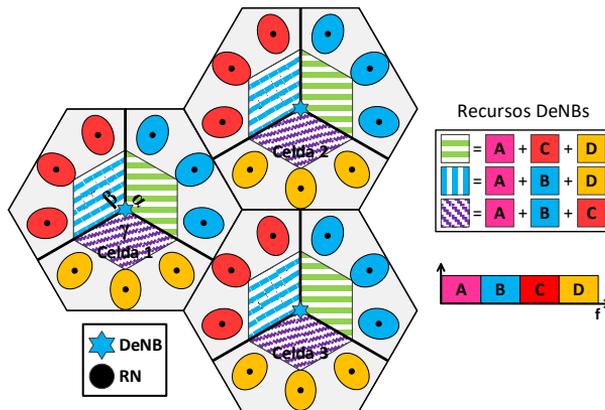


Figura 5.3: Reparto de recursos frecuenciales para DeNBs y RNs en las subtramas de acceso

Reutilizar los mismos recursos frecuenciales para los enlaces directos de los tres sectores de la celda genera niveles interferentes muy agresivos, si no se aplica alguna estrategia de coordinación para proteger a los mUEs ubicados en las fronteras entre sectores. Por lo tanto, es de esperar que las condiciones de los mUEs se vean degradadas por la fuerte interferencia intra-celular. Respecto a los rUEs, el reparto de recursos entre los enlaces de acceso de los RNs de un mismo sector es ortogonal, y los RNs vecinos de los sectores adyacentes emplean subbandas diferentes. Además, se evitan los RBs asignados a los enlaces directos del propio sector de su DeNB, por lo que las condiciones de interferencia de los rUEs serán buenas. No obstante, el ajuste del tamaño de las diferentes subbandas se realiza a nivel de celda, por lo que los RNs de celdas adyacentes sí que generarán interferencia co-layer debido a diferentes distribuciones de tráfico en celdas vecinas.

Respecto al reparto dinámico de los recursos frecuenciales, en primer lugar se calculan los RBs que se planifican de forma exclusiva a los enlaces directos para cada celda c ($NRB'_{directos,c}$) según la ecuación (5.27), que se corresponden con la subbanda A. N_{total} es el número total de RBs disponibles en la red, T_{req}^u es la tasa requerida del UE u , U_s es el conjunto de mUEs conectados al sector s y U_r es el conjunto de rUEs conectados al RN r . Por lo tanto, $NRB'_{directos,c}$ se obtiene de forma proporcional a la demanda de tráfico de los nodos, pero teniendo en cuenta que estos RBs son reutilizados por los tres sectores de la celda.

$$NRB'_{directos,c} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{\forall s \in c} \frac{\sum_{\forall u \in U_s} T_{req}^u}{\sum_{\forall u \in U_s} T_{req}^u + \sum_{\forall s \in c} \sum_{\forall r \in s} \sum_{\forall u \in U_r} T_{req}^u} \cdot N_{total} \quad (5.27)$$

Una vez que se han calculado los RBs planificados de forma exclusiva a los enlaces directos de la celda c , los RBs restantes se reparten entre los enlaces de acceso de los tres sectores de forma proporcional a su demanda de tráfico. De esta forma se obtienen los RBs planificados para los enlaces de acceso de cada sector s de la celda c ($NRB_{acceso,s,c}$) según la ecuación (5.28), que se corresponden con las subbandas B, C y D. Finalmente, se obtienen los RBs planificados para los enlaces directos de cada sector s de la celda c ($NRB_{directos,s,c}$), añadiendo los RBs asignados a los enlaces de acceso de los dos sectores restantes s' de la celda (5.29).

$$NRB_{acceso,s,c} = \frac{\sum_{\forall r \in s} \sum_{\forall u \in U_r} T_{req}^u}{\sum_{\forall s \in c} \sum_{\forall r \in s} \sum_{\forall u \in U_r} T_{req}^u} \cdot (N_{total} - NRB'_{directos,c}) \quad (5.28)$$

$$NRB_{directos,s,c} = NRB'_{directos,c} + \sum_{\substack{\forall s' \in c \\ s' \neq s}} NRB_{acceso,s',c} \quad (5.29)$$

Las propuestas presentadas en [57–59] permiten adaptar de forma dinámica los recursos planificados para los enlaces de acceso de los RNs. Sin embargo, para evitar que los enlaces backhaul se conviertan en el cuello de botella de las comunicaciones dirigidas a los rUEs, también es necesario considerar una propuesta para adaptar los recursos asignados a los enlaces backhaul a las condiciones cambiantes de distribución de carga. Por lo tanto, la principal limitación de estos trabajos es que no consideran de forma conjunta la adaptación de los recursos frecuenciales planificados para los enlaces backhaul y los enlaces de acceso.

Los trabajos que se han revisado hasta ahora están centrados en algoritmos y propuestas para adaptar de forma dinámica el reparto de los recursos frecuenciales entre los diferentes enlaces. No obstante, en la mayoría de ellos [49–56] no consideran un esquema de ICIC entre DeNBs que permita mejorar las condiciones de interferencia sufridas por los usuarios, así como aplicar una coordinación entre los recursos usados por los DeNBs y los usados por los RNs. Por otro lado, ninguno de ellos considera esquemas de reuso frecuencial eficientes entre los diferentes enlaces, que permitan compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul, al mismo tiempo que ofrecer condiciones de interferencia aceptables a los usuarios de la red. Respecto a los enlaces backhaul, o no se considera una propuesta específica [58, 59], o se considera un reparto ortogonal de recursos junto con los enlaces directos [49–57]. Y respecto a los enlaces de acceso, en la mayoría de trabajos se considera o un reparto ortogonal de recursos [49, 52, 57, 58], o el extremo opuesto, considerando un reuso completo de recursos entre los diferentes nodos que incrementa notablemente la interferencia generada [53, 54, 56]. En cualquier caso, son propuestas válidas que permiten adaptar la distribución de recursos de la red a distribuciones de carga heterogéneas y cambiantes.

Además de adaptar de forma dinámica el reparto de recursos frecuenciales entre los diferentes enlaces involucrados en los despliegues con relays a las condiciones cambiantes de demanda de tráfico, otro de los aspectos que pueden limitar las prestaciones de la red es la aplicación de un criterio de selección de nodo adecuado. Ya se ha visto en el capítulo anterior que el criterio CRE se considera una estrategia válida para aumentar el número de usuarios que se conectan a los RNs [46]. De esta forma se espera que la distribución de carga se mantenga más balanceada. Sin embargo, el criterio CRE no tiene en cuenta las condiciones de carga de los diferentes nodos de la red. Por lo tanto, aunque favorece el traspaso de usuarios a los RNs para que estos puedan beneficiarse de

menores pérdidas de propagación, podría llegar a saturar alguno de los RNs, provocando una degradación de las prestaciones de sus rUEs debido a una escasez de recursos frecuenciales.

En [60] emplean la configuración de despliegue 1 (Figura 5.1(c)), pero desplegando únicamente un RN en cada celda. Se considera reuso unidad entre DeNBs vecinos, sin embargo, la propuesta no considera un esquema de ICIC entre DeNBs que permita mejorar las condiciones de interferencia. En cuanto al reparto de recursos frecuenciales, aplican un esquema dinámico en base al número de UEs conectados a cada nodo. En las subtramas backhaul se considera un reparto ortogonal entre los diferentes enlaces, de tal forma que el DeNB reparte los RBs entre enlaces directos y el enlace backhaul de forma proporcional al número de UEs conectados a cada nodo. Posteriormente, en la subtrama de acceso consecutiva el RN podrá asignar a sus enlaces de acceso en los mismos RBs en los que ha recibido el backhaul, y el DeNB asignará a sus enlaces directos en los RBs restantes, que son los mismos que ha asignado a sus enlaces directos en la subtrama backhaul previa. Por lo tanto, se considera un reparto ortogonal de recursos en ambos tipos de subtramas que complica que se pueda compensar el consumo adicional de los UEs servidos por los RNs.

El artículo se centra en tres criterios de selección de nodo. El primero de ellos es un criterio convencional, en el que los UEs se conectan al nodo del que reciben un mayor nivel de RSRP. En el segundo criterio los UEs se conectan al nodo del que observan un mayor nivel de SINR. En ambos casos se estima la RSRP y la SINR en el enlace directo de los DeNBs y en el enlace de acceso de los RNs, ya que se puede asumir que las condiciones de los enlaces backhaul son mejores. Con el objetivo de tener en cuenta en la selección de nodo el consumo extra de recursos que conllevan los UEs que se conectan a los RNs, el tercer criterio considerado se basa en que los UEs se conecten al nodo que ofrece una mayor eficiencia espectral. Para calcular la eficiencia espectral que un UE podría alcanzar en cada nodo y en cada enlace estiman la SINR que observaría el UE respecto a los diferentes nodos candidatos, para posteriormente estimar la tasa de datos alcanzable aplicando la fórmula de Shannon. De esta forma, para cada DeNB d candidato se obtiene la eficiencia por RB que el UE u obtendría en su enlace directo (η_u^d). Por otro lado, para cada RN r candidato se obtiene la eficiencia por RB que el UE u obtendría en el enlace de acceso ($\eta_{u,acceso}^r$). Respecto al enlace backhaul, se emplea la eficiencia por RB que observa el RN r en su enlace con su DeNB ($\eta_{r,backhaul}$).

Para estimar la eficiencia espectral total que alcanzaría el UE u si se conecta al RN r es necesario considerar el consumo de recursos en ambos saltos. Considerando que la tasa alcanzable por el UE ($T_{alc,u}^r$) es igual a su tasa requerida (T_{req}^u), se puede estimar el número de RBs necesarios para satisfacer la tasa

requerida del UE, tanto en el enlace de acceso ($NRB_{req,u,acceso}^r$), como en el enlace backhaul ($NRB_{req,u,backhaul}^r$). Si además se considera que los RNs transmiten en su enlace de acceso lo que reciben en su enlace backhaul, se puede asumir que la tasa alcanzable por el UE u en ambos enlaces es la misma, tal y como se expresa en la ecuación (5.30). Por lo tanto, se puede calcular la eficiencia por RB que observaría el UE u si se conecta al RN r (η_u^r) aplicando la ecuación (5.31). Finalmente, el UE u se conectaría al nodo candidato que ofrezca una mayor eficiencia espectral (5.32), ya sea un DeNB (d^*) o un RN (r^*). C_d^u es el conjunto de DeNBs candidatos para el UE u , y C_r^u es el conjunto de RNs candidatos para el UE u .

$$T_{alc,u}^r = T_{req}^u = NRB_{req,u,acceso}^r \cdot \eta_{u,acceso}^r = NRB_{req,u,backhaul}^r \cdot \eta_{r,backhaul} \quad (5.30)$$

$$\eta_u^r = \frac{T_{alc,u}^r}{NRB_{req,u,acceso}^r + NRB_{req,u,backhaul}^r} \quad (5.31)$$

$$d^* / r^* = \underset{\substack{\forall d \in C_d^u \\ \forall r \in C_r^u}}{\text{arg max}} (\eta_u^d, \eta_u^r) \quad (5.32)$$

Los autores muestran en los resultados que el criterio de selección de nodo basado en la eficiencia espectral proporciona mejores prestaciones que los criterios basados en RSRP y SINR. Esta mejora se obtiene gracias a que para calcular la eficiencia espectral que los UEs observarían si se conectan a un RN, se están considerando los recursos frecuenciales extra que se consumen en los enlaces backhaul de los RNs. Sin embargo, aunque este criterio mejore las prestaciones de esquemas más convencionales basados en medidas de RSRP o SINR, de igual forma que en [46] no se están teniendo en cuenta las condiciones de carga de los diferentes nodos. Y esto puede conllevar distribuciones de carga de tráfico desequilibradas que pueden provocar fuertes degradaciones en las prestaciones de la red, debido a la falta de recursos frecuenciales disponibles en algunos nodos de la red.

En [61] emplean la configuración de despliegue 1 (Figura 5.1(c)), pero desplegando cuatro RNs en cada celda en lugar de dos. Aplican reuso unidad entre DeNBs vecinos, sin embargo, la propuesta no considera un esquema de ICIC entre DeNBs. Consideran RNs full-duplex “Tipo 1b” capaces de transmitir sus enlaces de acceso y recibir su enlace backhaul de forma simultánea en la misma banda frecuencial, empleando sistemas de antenas complejos que proporcionan un aislamiento adecuado. Respecto al reparto de recursos frecuenciales consideran un esquema fijo que no permite adaptarse a distribuciones heterogéneas y cambiantes de demanda de tráfico. Plantean un

reúso frecuencial completo de todo el ancho de banda en todos los nodos, generando unas condiciones de interferencia bastante agresivas para los UEs. En el caso de los DeNBs, los recursos disponibles se reparten de forma ortogonal entre enlaces directos y enlaces backhaul.

Los autores se centran en proponer un criterio de selección de nodo basado en un sistema de precios, de tal forma que los UEs calculan el coste de conectarse a cada uno de los nodos candidatos, y seleccionan el nodo que ofrece el menor coste. El coste calculado depende del número de RBs que necesita el UE para satisfacer su tasa requerida si se conecta a ese nodo, y de los RBs que quedan libres en dicho nodo. En primer lugar se calcula el precio por RB para cada DeNB d candidato ($p_d(t)$) y para cada RN r candidato ($p_r(t)$) según la ecuación (5.33). p_0 es un offset que se aplica al precio de los nodos y que permite ajustar el impacto del precio por RB en el coste total, N_{total} es el número total de RBs disponibles en el sistema, y $NRB_{asig,d}(t-1)$ y $NRB_{asig,r}(t-1)$ son el número de RBs asignados en la subtrama anterior por el DeNB d y por el RN r respectivamente. W es un factor que permite reducir el precio de los RNs si se le asigna un valor inferior a 1, con el objetivo de favorecer que más UEs se conecten a los RNs. El precio de un nodo candidato será mayor cuanto menor sea el número de RBs que quedan libres.

$$\begin{cases} p_d(t) = p_0 + \frac{1}{\sqrt{N_{total} - NRB_{asig,d}(t-1)}} \\ p_r(t) = W \cdot \left(p_0 + \frac{1}{\sqrt{N_{total} - NRB_{asig,r}(t-1)}} \right), \quad W \leq 1 \end{cases} \quad (5.33)$$

Una vez que se dispone del precio de todos los nodos candidatos, se estiman los RBs que necesita el UE para satisfacer su tasa requerida. Para ello, se estima la SINR que observaría el UE respecto a los diferentes nodos candidatos, para posteriormente estimar la tasa de datos alcanzable aplicando la fórmula de Shannon. De esta forma se estima el número de RBs necesarios para satisfacer la tasa requerida del UE u en el enlace directo para cada DeNB d candidato ($NRB_{req,u,directo}^d$), y en los enlaces backhaul ($NRB_{req,u,backhaul}^r$) y de acceso ($NRB_{req,u,acceso}^r$) para cada RN r candidato. Finalmente, se calcula el coste del UE u para cada nodo candidato ($M_u^d(t)$ y $M_u^r(t)$) multiplicando el número de RBs requeridos por el precio correspondiente, tal y como se expresa en la ecuación (5.34). En el caso de los RNs, el coste incluye tanto los RBs requeridos en el enlace backhaul del RN r con su DeNB d' , como los RBs requeridos en el enlace de acceso, de forma similar a la propuesta considerada en [60]. El UE u se conectará al nodo que le ofrezca un menor coste (5.35).

$$\begin{cases} M_u^d(t) = NRB_{req,u,directo}^d \cdot p_d(t) \\ M_u^r(t) = NRB_{req,u,backhaul}^r \cdot p_{d'}(t) + NRB_{req,u,acceso}^r \cdot p_r(t), \quad r \in d' \end{cases} \quad (5.34)$$

$$d^* / r^* = \underset{\substack{\forall d \in C_d^u \\ \forall r \in C_r^u}}{\arg \min} (M_u^d(t), M_u^r(t)) \quad (5.35)$$

En [62] emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero desplegando tres RNs en cada celda en lugar de seis. Consideran RNs outband “Tipo 1a”, de tal forma que los enlaces de acceso utilizan una banda frecuencial deferente a la empleada por los enlaces backhaul. Aplican reúso frecuencial unidad entre DeNBs vecinos, pero no consideran un esquema de ICIC que permita mejorar las condiciones de interferencia de los UEs. El reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul es ortogonal, y es el scheduler del DeNB el que se encarga de asignar cada RB a los diferentes enlaces. Desde el punto de vista de los RNs, todos ellos reutilizan completamente la banda frecuencial dedicada a los enlaces de acceso. Gracias a utilizar una banda frecuencial diferente a la empleada por los DeNBs para los enlaces directos y enlaces backhaul, las condiciones de interferencia de los rUEs serán buenas, ya que además el despliegue de RNs considerado no es muy intensivo. Sin embargo, esto se consigue a costa de necesitar un mayor ancho de banda, incrementando notablemente el coste económico de la red.

La propuesta analiza el escenario en el que una de las celdas se encuentra sobrecargada, y proponen un criterio de selección de nodo para traspasar UEs a los RNs de las celdas vecinas. Cuando una celda detecta que su nivel de carga es demasiado alto se inicia el procedimiento para escoger qué UEs deben ser traspasados a las celdas vecinas. Para ello, la celda sobrecargada c trata de maximizar la métrica M_c , que está compuesta por dos términos. El primer término (J_c) es el índice de Jain (5.36), y se utiliza para evaluar la equitatividad en las tasas de datos alcanzables (T_{alc}^u) por todos los UEs u de la celda, siendo U_c el conjunto de UEs conectados actualmente a la celda c , incluyendo tanto mUEs como rUEs. $||$ permite obtener la cardinalidad del conjunto. El segundo término considera la tasa total alcanzable por todos los UEs de la celda c . La celda c buscará maximizar la métrica M_c (ecuación (5.37)) considerando como nodos candidatos para sus UEs tanto el DeNB, como los RNs desplegados en el propio DeNB y en los DeNBs vecinos.

$$J_c = \frac{\left(\sum_{\forall u \in U_c} T_{alc}^u \right)^2}{|U_c| \cdot \sum_{\forall u \in U_c} (T_{alc}^u)^2} \quad (5.36)$$

$$M_c = J_c + \sum_{\forall u \in U_c} T_{alc}^u \quad (5.37)$$

En [63] emplean la configuración de despliegue 2 (Figura 5.1(d)), pero considerando celdas trisectorizadas y desplegando un RN de forma aleatoria en cada uno de los sectores. Los autores consideran RNs full-duplex “Tipo 1b” capaces de transmitir sus enlaces de acceso y recibir su enlace backhaul de forma simultánea en la misma banda frecuencial. El reparto de recursos entre los diferentes enlaces es fijo, y se basa en dividir el ancho de banda del sistema en tres subbandas. Una subbanda será usada para los enlaces directos, otra para los enlaces backhaul, y la restante para los enlaces de acceso. Cada sector podrá asignar las subbandas reservadas para los enlaces directos y para los enlaces backhaul de forma completa, y cada RN podrá asignar completamente la subbanda reservada para los enlaces de acceso, de tal forma que se considera un reuso frecuencial unidad a nivel de sector. No obstante, la propuesta no considera un esquema de coordinación de interferencias, por lo que las condiciones de interferencia sufridas por los mUEs serán demasiado agresivas, especialmente para los mUEs situados en las zonas exteriores de las celdas y en las fronteras entre sectores. Respecto a los rUEs, como los enlaces de acceso emplean una subbanda propia y solo se despliega un RN por sector de forma aleatoria, sus condiciones de interferencia serán buenas en general.

El trabajo se enfoca en proponer un criterio de selección de nodo basado en la adaptación dinámica del offset de cada nodo que se aplica sobre un criterio RSRP convencional. Tal y como se expresa en la ecuación (5.38), el criterio de selección de nodo se basa en que para cada nodo n se considera un offset (O_n) que se suma a la RSRP recibida por el UE u de ese nodo ($RSRP_u^n$). Por lo tanto, cada UE u se conecta al nodo que maximiza la suma de la RSRP y del offset, ya sea un DeNB o un RN, considerando un conjunto de nodos candidatos C_n^u .

$$n^* = \arg \max_{\forall n \in C_n^u} \left((RSRP_u^n)_{dB} + (O_n)_{dB} \right) \quad (5.38)$$

La propuesta considera emplear técnicas de inteligencia artificial (AI) para adaptar de forma dinámica el offset de todos los nodos de la red. En concreto emplean dos técnicas, basándose una de ellas en el aprendizaje por refuerzo, mientras que la segunda técnica se basa en un algoritmo genético. En ambas técnicas se busca maximizar una función de utilidad objetivo, considerando tres funciones diferentes (5.39). En la primera función (M_1) se busca maximizar el número de UEs que satisfacen su tasa requerida, donde N es el conjunto de todos los nodos de la red (incluyendo DeNBs y RNs), U_n es el conjunto de UEs conectados al nodo n , S_u representa la satisfacción de la tasa requerida del UE u (T_{req}^u), y $T_{serv,u}^n$ es la tasa servida al UE u por el nodo n . La segunda función (M_2)

busca maximizar la media geométrica de las tasas servidas a los UEs. Y finalmente, la tercera función (M_3) busca maximizar la suma logarítmica del ratio de satisfacción de la tasa requerida de los UEs. Por lo tanto, las técnicas de AI adaptaran los valores del offset de todos los nodos de la red (O_n), con el objetivo de maximizar la función objetivo.

$$\begin{cases} M_1 = \frac{1}{|N|} \cdot \sum_{\forall n \in N} \left(\frac{1}{|U_n|} \cdot \sum_{\forall u \in U_n} S_u \right), S_u = 1 \text{ si } T_{serv,u}^n \geq T_{req}^u, S_u = 0 \text{ resto} \\ M_2 = \prod_{\forall n \in N} \prod_{\forall u \in U_n} \left((T_{serv,u}^n)^{1/|U_n|} \right)^{1/|N|} \\ M_3 = \sum_{\forall n \in N} \sum_{\forall u \in U_n} \log \left(\frac{T_{serv,u}^n}{T_{req}^u} \right) \end{cases} \quad (5.39)$$

Las propuestas presentadas en [46, 60] no tienen en cuenta la carga de tráfico de los diferentes nodos de la red, lo que puede provocar una distribución de carga desequilibrada, conllevando que ciertos nodos no dispongan de suficientes recursos frecuenciales para satisfacer los requisitos de QoS de sus usuarios, impactando significativamente las prestaciones de la red. Por el contrario, los criterios de selección de nodo presentados en [61–63] sí que tienen en cuenta la carga de los nodos, permitiendo alcanzar una distribución más equitativa de la demanda de tráfico. No obstante, además de considerar criterios de selección de nodo que permitan distribuir mejor la demanda de tráfico entre todos los nodos de la red, es necesario considerar de forma conjunta esquemas de ICIC que permitan garantizar condiciones de interferencia adecuadas a todos los UEs de la red, así como considerar esquemas de reuso frecuencial eficientes, que permitan compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul, pero manteniendo niveles interferentes adecuados para todos los enlaces, siendo esta la principal limitación de estos trabajos. Es por ello que en este capítulo se propone un algoritmo que combina una distribución dinámica de recursos frecuenciales entre nodos y enlaces, que se adapta a distribuciones de demanda de tráfico heterogéneas y variables, y un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga para tratar de maximizar las prestaciones del sistema. El objetivo de este algoritmo es tratar de hacer frente a las limitaciones encontradas en los esquemas propuestos en la literatura.

5.2 Modelo del sistema con despliegue de relays

En este capítulo se continúa empleando el mismo modelo del sistema que se ha considerado en el capítulo anterior, pero en este caso nos limitamos a la configuración de despliegue de 2 RNs por sector (Figura 4.7(a)). El trabajo sigue

centrado en relays inband half-duplex Tipo 1, sobre la estructura de trama FDD, y en las transmisiones en el enlace downlink (DL). Las subtramas de acceso y backhaul se multiplexan en tiempo (TDM), y se alternan para cada relay. De la misma forma que en los capítulos anteriores, y siguiendo las recomendaciones para el desarrollo de LTE, los recursos frecuenciales del sistema se dividen en RBs. Además, igual que en el capítulo anterior, el ancho de banda del sistema se divide en 9 GrRBs (Figura 4.9), con el objetivo de poder explicar de una forma más clara los recursos frecuenciales que son asignados a cada nodo y a cada enlace.

El objetivo que se persigue en este capítulo es proponer un algoritmo que combina un esquema de ICIC y RA que adapta de forma dinámica la distribución de recursos en condiciones de carga heterogéneas y un criterio de selección de nodo que permite balancear la carga de tráfico. Por sencillez en la propuesta del esquema de ICIC y RA dinámico se emplea la estructura de trama convencional, en lugar de aplicar la estructura de combinación de tramas, pese a que, como se ha visto en el capítulo anterior, esta última permite obtener mejores resultados a nivel de throughput global. Del mismo modo, también se emplea la configuración de 2 RNs por sector en vez de la configuración de 4 RNs por sector. No obstante, el algoritmo que se propone puede emplearse también sobre la configuración de 4 RNs por sector y sobre la estructura de combinación de tramas llevando a cabo pequeñas modificaciones para ajustarlo al escenario concreto, obteniéndose además conclusiones similares.

Dentro de los esquemas de ICIC y RA propuestos en el capítulo anterior para la estructura de trama convencional, los esquemas basados en SFR mejoran las prestaciones de los esquemas basados en FFR. Es por ello que para el algoritmo que se propone en este capítulo se ha seleccionado el esquema basado en SFR como el esquema de RRM aplicado para el despliegue de relays. En la Figura 5.4 se representa el esquema SFR_3GrRBs propuesto para las subtramas de acceso. También se representan los recursos prioritarios para los enlaces directos de cada sector de los DeNBs, aplicándose además la misma ordenación en la asignación de recursos en los DeNBs que la que se ha aplicado en el capítulo anterior. De esta forma, los mUEs reciben asignaciones en primer lugar en aquellos RBs que están planificados para el sector que les da servicio. No obstante, cuando un sector ocupa todos sus RBs prioritarios, comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda, seleccionando el sector que tenga menor ocupación. Además, continuando con la filosofía aplicada en el capítulo anterior, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en el mismo TTI en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Finalmente, tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, si un RN utiliza para sus enlaces de acceso los RBs planificados para la subbanda exterior de las celdas adyacentes, la interferencia que recibirían los rUEs podría ser

demasiado elevada. Por ello, se sigue el mismo planteamiento que el aplicado en el capítulo anterior y no se considera una subbanda exterior de recursos de forma explícita, de tal forma que el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs del sistema.

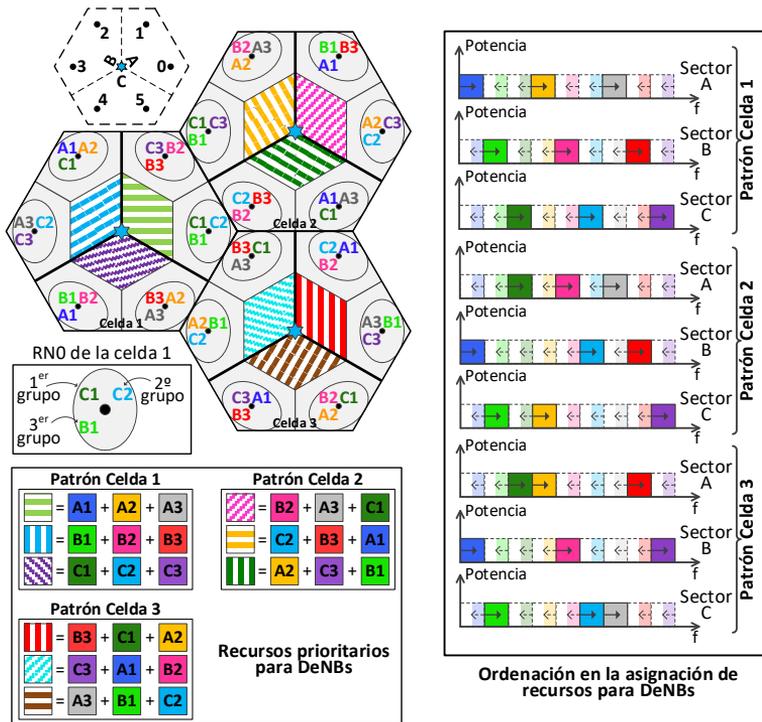


Figura 5.4: RA del esquema SFR_3GrRBs para DeNBs y RNs en subtramas de acceso (2 RNs por sector)

En el esquema basado en SFR se definen tres patrones de celda diferentes, modificando los RBs que se planifican como prioritarios para cada sector en las diferentes celdas, con el objetivo de poder asignar a los enlaces de acceso de los RNs recursos frecuenciales con menores niveles de interferencia cross-layer. La idea principal del esquema SFR_3GrRBs es que cada RN reutiliza en sus enlaces de acceso los GrRBs que no están planificados para su propio sector, seleccionando los GrRBs que reciben menores niveles de interferencia cross-layer de las celdas vecinas y asignando siempre que sea posible diferentes GrRBs a RNs vecinos para minimizar también la interferencia co-layer. En la Figura 5.4 se representa qué grupo de recursos de los enlaces de acceso de los RNs se escoge en primer lugar. En línea con los esquemas propuestos en el capítulo anterior, los RNs asignan la misma potencia de transmisión a todos sus RBs disponibles.

Los resultados analizados en el capítulo anterior, bajo condiciones de carga homogéneas, muestran que asignar un mayor o un menor número de RBs a los enlaces de acceso de los RNs, no tiene un impacto muy significativo en el throughput alcanzable por los enlaces directos en las subtramas de acceso. Además, también se ha visto que asignar 3 GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN en la configuración de 2 RNs por sector puede ser la cantidad adecuada, ya que incrementar la cantidad de recursos por encima de esos 3 GrRBs no aporta una ganancia de prestaciones muy notable. La asignación de recursos a los enlaces de acceso de los RNs se puede ajustar para balancear las prestaciones de los mUEs y los rUEs, sin embargo, como se ha visto en el capítulo anterior, el throughput alcanzable por los rUEs no siempre se puede incrementar aumentando los RBs planificados para los RNs. Esto es debido principalmente a limitaciones en la asignación de recursos para los enlaces backhaul, pero también debido a otros factores como los que se han visto en el capítulo anterior, ya que al incrementar los RBs asignados a los enlaces de acceso, de acuerdo con los principios de diseño planteados, la potencia de transmisión por RB se reduce, y los rUEs son más vulnerables a la interferencia y, además, al aumentar el reuso frecuencial entre RNs vecinos, la interferencia co-layer es más agresiva, degradándose la SINR observada por los rUEs.

En las subtramas de acceso, todos los recursos frecuenciales del sistema están disponibles para los enlaces directos. Además, como no siempre se puede incrementar el throughput alcanzable por los rUEs aumentando los RBs asignados a los enlaces de acceso de los RNs, y la asignación de 3 GrRBs a cada RN es una elección adecuada, el esquema de RA para las subtramas de acceso se mantiene fijo. Por lo tanto, tal y como se representa en la Figura 5.4, los enlaces directos pueden utilizar todos los RBs del sistema, definiéndose los GrRBs prioritarios para cada sector, y cada RN puede asignar sus enlaces de acceso en los 3 GrRBs planificados. Por el contrario, el esquema de RA para las subtramas backhaul se ajusta dinámicamente bajo condiciones de carga heterogéneas, adaptando la distribución de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul, y se explica en el siguiente apartado.

5.3 Esquema dinámico de RA-ICIC y criterio de selección de nodo

En este apartado se describen el esquema de RA-ICIC dinámico y el criterio de selección de nodo que se proponen. El objetivo es proponer un algoritmo que combine una distribución dinámica de recursos frecuenciales entre nodos y enlaces que pueda ajustarse ante condiciones de carga heterogéneas, y un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga para tratar de

maximizar las prestaciones del sistema. El esquema dinámico de RA-ICIC se tiene que encargar de decidir las particiones frecuenciales asignadas a cada nodo y adaptar el tamaño de cada una de las particiones a cambios en la distribución de usuarios o en la distribución de tráfico. Al mismo tiempo, el criterio de selección de nodo busca conectar a los usuarios al nodo que proporciona una mejor utilización de los recursos frecuenciales siempre que sea posible. La principal idea que hay detrás del criterio de selección de nodo es optimizar el consumo de recursos frecuenciales de los usuarios, a la vez que se intenta garantizar que se satisfagan los requisitos de QoS de los usuarios.

En primer lugar, se explica el esquema dinámico de RA-ICIC, para posteriormente explicarse el criterio de selección de nodo. No obstante, ambos componentes forman parte del algoritmo global y se llevan a cabo de forma conjunta. De tal forma que el esquema dinámico de RA-ICIC toma como parámetros de entrada las estimaciones de la cantidad de RBs que debería recibir cada nodo, obtenidas en el criterio de selección de nodo. A partir de estas estimaciones, el esquema dinámico de RA-ICIC tratará de alcanzar la distribución de recursos deseada.

5.3.1 Convenio de símbolos

Las siguientes tablas resumen la nomenclatura empleada a lo largo de la descripción del esquema dinámico de RA-ICIC y del criterio de selección de nodo, que se presentan en los siguientes subapartados de este capítulo.

U_c	Conjunto de usuarios de la celda
U_s	Conjunto de usuarios de la celda conectados al sector s
U_r	Conjunto de usuarios de la celda conectados al RN r
P_r	GrRB primario del RN r
S_r	GrRB secundario del RN r
$SINR_{TH}^{cand}$	SINR umbral para considerar que un UE es candidato para ser conectado a un nodo
P_{TH}^{interc}	Porcentaje umbral de incremento de la tasa de datos alcanzable para el intercambio de nodo

Tabla 5.1: Parámetros generales

5.3 Esquema dinámico de RA-ICIC y criterio de selección de nodo

T_{req}^u	Tasa requerida del servicio cursado por el usuario u
$W_{UE,u,directo}^s$	Estimación del consumo de RBs del UE u en su enlace directo con el sector s
$W_{UE,u,acceso}^r$	Estimación del consumo de RBs del UE u en su enlace de acceso con el RN r
$W_{UE,u,backhaul}^r$	Estimación del consumo de RBs del UE u en el enlace backhaul del RN r
$\eta_{directos,s,z}$	Eficiencia promedio por RB para los enlaces directos del sector s , en la zona z
$\eta_{acceso,r}$	Eficiencia promedio por RB para los enlaces de acceso del RN r
$\eta_{backhaul,r}$	Eficiencia promedio por RB para el enlace backhaul del RN r

Tabla 5.2: Parámetros relacionados con la estimación de la demanda de RBs de los UEs

D_{DeNB}	Estimación de la demanda total de RBs del DeNB
$D_{directos,s}$	Estimación de la demanda de RBs de los enlaces directos del sector s
$D_{backhaul,r}$	Estimación de la demanda de RBs del enlace backhaul del RN r
$\beta_{directos,s}$	Demanda de RBs normalizada de los enlaces directos del sector s
$\beta_{backhaul,r}$	Demanda de RBs normalizada del enlace backhaul del RN r
$NRB_{est,directos,s}$	Estimación del número total de RBs que debería recibir el sector s para sus enlaces directos
$NRB_{est,directos,s}^{acceso}$	Estimación del número de RBs que debería recibir el sector s para sus enlaces directos en las subtramas de acceso
$NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$	Estimación del número de RBs que debería recibir el sector s para sus enlaces directos en las subtramas backhaul
$NRB_{est,acceso,r}$	Estimación del número total de RBs que debería recibir el RN r para sus enlaces de acceso
$NRB_{est,backhaul,r}$	Estimación del número total de RBs que debería recibir el RN r para su enlace backhaul

Tabla 5.3: Parámetros relacionados con la estimación de la cantidad de RBs que debería recibir cada nodo

$N_{total,c}$	Número total de RBs asignables en la celda
$N_{acceso}^{total,c}$	Número total de RBs asignables en la celda en las subtramas de acceso
$N_{backhaul}^{total,c}$	Número total de RBs asignables en la celda en las subtramas backhaul
$N_{backhaul}^{total,directos,c}$	Número total de RBs asignables en la celda para los enlaces directos en las subtramas backhaul
$N_{acceso}^{total,s}$	Número total de RBs asignables en el sector s en las subtramas de acceso
$N_{backhaul}^{total,s}$	Número total de RBs asignables en el sector s en las subtramas backhaul
$N_{backhaul}^{total,directos,s}$	Número total de RBs asignables en el sector s para los enlaces directos en las subtramas backhaul
$N_{total,acceso,r}$	Número total de RBs asignables en el RN r para sus enlaces de acceso

Tabla 5.4: Parámetros relacionados con las restricciones impuestas por el esquema de ICIC

$T_{alc,u}$	Estimación de la tasa de datos promedio que el usuario u sería capaz de alcanzar en el nodo que le da servicio actualmente
$T_{alc,u,directo}^s$	Estimación de la tasa de datos promedio que el usuario u sería capaz de alcanzar en su enlace directo con el sector s
$T_{alc,u,acceso}^r$	Estimación de la tasa de datos promedio que el usuario u sería capaz de alcanzar en su enlace de acceso con el RN r
$T_{alc,u,backhaul}^r$	Estimación de la tasa de datos promedio que el usuario u sería capaz de alcanzar en el enlace backhaul del RN r

Tabla 5.5: Parámetros relacionados con la estimación de la tasa de datos alcanzable

5.3.2 Esquema dinámico de RA-ICIC

En las subtramas backhaul el esquema de ICIC y RA distribuye y asigna los recursos frecuenciales de forma dinámica entre los enlaces directos y los enlaces backhaul. En este subapartado se explica este esquema dinámico de RA-ICIC para las subtramas backhaul, pero en primer lugar es necesario explicar los parámetros de entrada de los que depende el algoritmo. Para cada DeNB se estima la demanda de RBs de todos los enlaces implicados, de tal forma que se obtiene $D_{directos,s}$ para cada sector s de la celda y $D_{backhaul,r}$ para cada RN r de la celda. Las estimaciones de las demandas de RBs consideran la satisfacción de los requisitos de tráfico de las conexiones de los UEs. Una vez que se han estimado las demandas de RBs para todos los enlaces de la celda, se calcula el número de RBs que debería recibir cada sector para servir a sus enlaces directos

($NRB_{est,directos,s}$) y el número de RBs que debería recibir cada RN para su enlace backhaul ($NRB_{est,backhaul,r}$). Si no hay suficientes recursos frecuenciales para satisfacer las demandas de todos los enlaces de la celda, los RBs disponibles se reparten de forma proporcional a la demanda de cada enlace, pero satisfaciendo siempre las restricciones impuestas por el esquema de ICIC. La estimación de las demandas de RBs y el cálculo de los RBs que debería recibir cada nodo se explica en detalle en el siguiente subapartado junto con el criterio de selección de nodo.

Por lo tanto, el esquema dinámico de RA-ICIC recibe como parámetros de entrada $NRB_{est,directos,s}$ para cada sector s de la celda y $NRB_{est,backhaul,r}$ para cada RN r de la celda, y trata de alcanzar esta distribución de recursos. No obstante, si las restricciones del esquema de ICIC no permiten alcanzar esta distribución, el algoritmo intentará proporcionar la distribución de recursos más parecida posible. En la Figura 5.5 se representa el esquema de RA-ICIC que se utiliza como base para distribuir dinámicamente los recursos frecuenciales entre los enlaces directos y enlaces backhaul. Se basa en el esquema Back_op4 propuesto en el capítulo anterior, sobre el que se han hecho ligeras modificaciones en la asignación de recursos para favorecer el ajuste dinámico de RBs. Si se toma como referencia la celda 1, en el esquema Back_op4 propuesto en el capítulo anterior el sector A asignaba prioritariamente a sus mUEs en los grupos A1 y A2, mientras que el enlace backhaul del RN0 recibía los grupos B2 y A3, y el enlace backhaul del RN1 recibía los grupos C1 y C3. En el esquema de ICIC y RA utilizado como base en este capítulo se intercambia uno de los GrRBs planificados para los enlaces directos de cada sector, con uno de los GrRBs planificados para el enlace backhaul de un RN del sector. En el caso del sector A de la celda 1 se intercambian los grupos A1 y A3, de tal forma que el grupo A1 pasaría a ser planificado para el enlace backhaul del RN0 y el grupo A3 quedaría disponible para ser planificado para los enlaces directos del sector A. Este intercambio de GrRBs se lleva a cabo porque permite favorecer el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul, consiguiéndose que el reparto de RBs alcanzado por el algoritmo se acerque más al reparto de RBs buscado ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$).

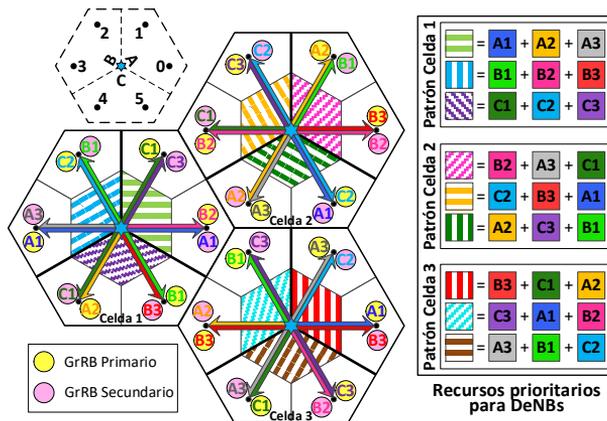


Figura 5.5: Esquema de RA-ICIC para DeNBs utilizado como base para distribuir los recursos dinámicamente en las subtramas backhaul (2 RNs por sector)

Como punto de partida para la descripción del esquema dinámico de RA-ICIC es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- En línea con los esquemas estáticos de ICIC y RA propuestos en el capítulo anterior, cada RB solo puede ser asignado un máximo de dos veces en el mismo TTI en cada DeNB. Además, no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes a la misma celda. Por lo tanto, dentro de una misma celda, un RB puede ser asignado en el mismo TTI a los enlaces directos de un sector y al enlace backhaul de un RN, o alternativamente al enlace backhaul de dos RNs.
- Los RNs emplean una antena direccional para comunicarse con su DeNB, así que la interferencia recibida de las celdas vecinas se ve fuertemente reducida. Respecto al propio DeNB, es necesario tener en cuenta que, si el RB asignado al enlace backhaul de un RN es reutilizado por el sector adyacente, la interferencia generada en el enlace backhaul es más fuerte que si ese RB es reutilizado por el sector opuesto. Por ejemplo, en el caso del RN0, el sector adyacente es el sector C, mientras que el sector opuesto es el sector B. Por lo tanto, con el objetivo de reducir la interferencia intra-celular, en primer lugar, el reparto de RBs se lleva a cabo de tal forma que, si un RB es planificado para el enlace backhaul de un RN, ese RB solo puede ser reutilizado por el sector opuesto. Considerando este planteamiento se pueden distinguir tres grupos diferentes de recursos frecuenciales en cada RN:
 - Si se toma como referencia el RN0 de la celda 1, los grupos B1, B2 y B3 son potencialmente asignables a su enlace backhaul, ya que estos GrRBs están inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector opuesto (sector B) y, por lo tanto, la interferencia recibida por el enlace backhaul será más débil en estos recursos frecuenciales.

- Los grupos A1, A2 y A3 están inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector, pero si fuera necesario, estos GrRBs podrían ser asignados al enlace backhaul del RN0 de la celda 1.
- Por último, los grupos C1, C2 y C3 están inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector adyacente (sector C) y, por lo tanto, de forma preliminar se consideran prohibidos para el enlace backhaul del RN0 de la celda 1, ya que la interferencia recibida por el enlace backhaul sería más fuerte. No obstante, y en último lugar, si el enlace backhaul de un RN no ha alcanzado todavía los RBs que debería recibir ($NRB_{est,backhaul,r}$), y si se cumplen determinadas condiciones, estos recursos frecuenciales pueden asignarse a su enlace backhaul.
- Tal y como se representa en la Figura 5.5, de forma inicial se planifican tres GrRBs para los enlaces directos de cada sector. El esquema de RA dinámico tratará de asignar los enlaces backhaul de los RNs reutilizando RBs planificados para los enlaces directos de otros sectores, escogiendo prioritariamente los RBs planificados para los enlaces directos del sector opuesto al RN. No obstante, si es necesario, el algoritmo asignará al enlace backhaul de un RN recursos inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector, de tal forma que estos RBs dejaran de estar disponibles para los enlaces directos.
- De forma inicial, la asignación de RBs al enlace backhaul de cada RN se planifica sobre una banda de recursos frecuenciales, definiéndose un grupo primario para cada RN, de tal forma que los RBs del grupo primario son asignados preferiblemente al enlace backhaul de ese RN. En la Figura 5.5 se representa el GrRB primario de cada RN mediante un círculo amarillo con línea discontinua. Los GrRBs primarios de los diferentes RNs de la celda son ortogonales entre sí, y se escoge para cada RN un GrRB planificado para los enlaces directos de su sector opuesto, con el objetivo de minimizar la interferencia intra-celular.
- Si estas primeras bandas de recursos frecuenciales se asignan completamente a los RNs, se ha planificado una segunda banda de recursos para cada RN. Se trata del grupo secundario y se representan mediante un círculo rosa con línea continua en la Figura 5.5. En el caso de los RNs pares, el GrRB secundario es un grupo inicialmente planificado a los enlaces directos de su sector, por lo que se podrán asignar RBs de este grupo secundario al enlace backhaul del RN si no han sido asignados a los enlaces directos. Para el caso de los RNs impares, el GrRB secundario es un grupo planificado para los enlaces directos de su sector opuesto.
- En situaciones con demandas variables de capacidad para los enlaces backhaul, se tratará de asignar preferiblemente los recursos de los grupos primario y secundario a cada RN, pero también puede asignarse cualquier RB

no planificado para satisfacer demandas de capacidad más elevadas. No obstante, todas las asignaciones de recursos tienen que satisfacer las restricciones de ICIC recopiladas en la Tabla 5.6 y en la Tabla 5.7, para los RNs pares e impares respectivamente.

Cada RN_i par ($i = 0, 2, 4$):

- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su sector opuesto (p. ej. grupos B1, B2 y B3 para el RN_0 de la celda 1), si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 2) \bmod 6]$ y $[(i + 5) \bmod 6]$ (p. ej. RN_2 y RN_5 , si se considera el RN_0).
- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector (p. ej. grupos A1, A2 y A3 para el RN_0 de la celda 1), si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 1) \bmod 6]$ y $[(i + 4) \bmod 6]$ (p. ej. RN_1 y RN_4 , si se considera el RN_0).
- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su sector adyacente (p. ej. grupos C1, C2 y C3 para el RN_0 de la celda 1), si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 2) \bmod 6]$ y $[(i + 5) \bmod 6]$.

Tabla 5.6: Decisiones de asignación de RBs para los RNs pares

Cada RN_i impar ($i = 1, 3, 5$):

- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su sector opuesto, si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 1) \bmod 6]$ y $[(i + 4) \bmod 6]$.
- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector, si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 2) \bmod 6]$ y $[(i + 5) \bmod 6]$.
- Puede recibir RBs potencialmente planificados para los enlaces directos de su sector adyacente, si los RBs no han sido asignados previamente a los enlaces backhaul de uno o ambos de los siguientes RNs: $[(i + 1) \bmod 6]$ y $[(i + 4) \bmod 6]$.

Tabla 5.7: Decisiones de asignación de RBs para los RNs impares

Aplicando estas consideraciones, el algoritmo trata de alcanzar la distribución de recursos deseada ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), y si esta distribución no es posible, trata de obtener la distribución de recursos más parecida posible. En primer lugar, el algoritmo intenta satisfacer la demanda de capacidad del enlace backhaul de cada RN asignándole los RBs de los grupos primario y secundario. Una vez que los GrRBs primarios y secundarios se han asignado, si algún RN no ha sido capaz todavía de alcanzar el número de RBs que debería recibir su enlace backhaul ($NRB_{est,backhaul,r}$), el algoritmo intentará asignar RBs no planificados inicialmente a esos RNs. No obstante, estas asignaciones de RB deben satisfacer siempre las restricciones de ICIC de la Tabla 5.6 y la Tabla 5.7. En la primera parte del algoritmo, los RBs planificados para los enlaces directos del sector adyacente de un RN se consideran prohibidos, y por lo tanto no serán asignados al enlace backhaul de ese RN. De esta forma, el algoritmo tratará de asignar a los RNs recursos no planificados que pertenezcan a los GrRBs del sector opuesto y del propio sector. Para ambos tipos de grupos de RBs se tendrán que satisfacer las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7), que fundamentalmente garantizan que si un RB es asignado al enlace backhaul de un RN, ese RB solo puede ser reutilizado por su sector opuesto. Por ejemplo, si el algoritmo intenta asignar al RN0 de la celda 1 recursos frecuenciales del grupo B3, como se trata de un GrRB planificado para los enlaces directos de su sector opuesto (sector B), el algoritmo comprobará que esos RBs no han sido asignados previamente al RN2 y al RN5. El sector A es el sector adyacente del RN2 y del RN5, por eso no se permite reutilizar para el enlace backhaul del RN0 los mismos RBs que se están asignando a los enlaces backhaul de ambos RNs. El RN1 y el RN4 tienen prohibidos los RBs del grupo B3, ya que el sector B es su sector adyacente. Y finalmente, el RN3 es el relay opuesto al RN0, y por lo tanto está permitido que ambos RNs reutilicen los mismos RBs.

En la última parte del algoritmo, si todavía quedan RNs que no han satisfecho los RBs que deberían recibir para su enlace backhaul, se intenta asignar RBs inicialmente planificados para los enlaces directos del sector adyacente. Las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7) para este tipo de GrRB garantizan que las asignaciones no introducen interferencia adicional sobre los enlaces backhaul ya asignados. Por otro lado, de cara a estimar adecuadamente los RBs que se están asignando al enlace backhaul, el algoritmo tiene en cuenta que el RN que recibe RBs planificados para su sector adyacente verá degradadas sus prestaciones en dichos RBs. Por ejemplo, si el algoritmo intenta asignar al RN0 de la celda 1 recursos frecuenciales del grupo C1, el algoritmo comprueba que esa asignación no añade interferencia adicional a los enlaces backhaul del RN2 y del RN5, ya que el sector A es su sector adyacente. Sin embargo, aunque el RN4 haya recibido el grupo C1, como el sector A es su

sector opuesto, la asignación de RBs del grupo C1 al enlace backhaul del RN0 no introduce interferencia adicional sobre el enlace backhaul del RN4. Y desde el punto de vista del RN0, se asume que su sector adyacente usará esos RBs, y se tiene en cuenta la degradación de prestaciones en esos RBs para calcular adecuadamente los RBs asignados al enlace backhaul del RN0.

A continuación se describen los pasos que sigue el esquema de RA dinámico para tratar de alcanzar la distribución de recursos deseada ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), teniendo en cuenta las consideraciones generales explicadas anteriormente, y respetando las restricciones de ICIC recopiladas en la Tabla 5.6 y la Tabla 5.7. De tal forma que, el esquema de RA dinámico solo asignará un RB al enlace backhaul de un RN si se satisfacen las restricciones de ICIC. Además, hay que tener en cuenta que en la primera parte del algoritmo solo se asignan a los enlaces backhaul RBs que pertenezcan a los grupos inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector opuesto y de su propio sector, con el objetivo de reducir la interferencia intra-celular. Mientras que en los últimos pasos (7 y 8, del algoritmo que se describe a continuación), se permite asignar a los enlaces backhaul RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector adyacente, con el objetivo de alcanzar la distribución de recursos más parecida posible a la distribución deseada, y de maximizar en la medida de lo posible los RBs que quedan disponibles para los enlaces directos. Por último, merece la pena destacar que cuando un RN alcanza el número de RBs que se ha estimado que debería recibir ($NRB_{est,backhaul,r}$), este RN deja de considerarse en el resto de pasos del esquema de RA dinámico. Los pasos del esquema de RA dinámico son los siguientes:

Paso 0: Como paso previo antes de iniciar el algoritmo se reciben como parámetros de entrada $NRB_{est,directos,s}$ para cada sector s de la celda, y $NRB_{est,backhaul,r}$ para cada RN r de la celda. Hay que tener en cuenta que los enlaces directos pueden ser asignados tanto en las subtramas de acceso como en las subtramas backhaul, por lo tanto, $NRB_{est,directos,s}$ engloba el número de RBs que debería recibir el sector en ambos tipos de subtrama. Para obtener el número de RBs que debería recibir cada sector para sus enlaces directos en la subtrama backhaul ($NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$) se emplea la ecuación (5.40). En primer lugar, se descuenta el número de RBs que pueden ser asignados a los enlaces directos de cada sector s en las subtramas de acceso ($N_{total,s}^{acceso} = 3 \text{ GrRBs}$). Posteriormente, si tras descontar los RBs asignables en las subtramas de acceso, el número de RBs que debería recibir un sector s es superior al número total de RBs asignables en el sector para los enlaces directos en las subtramas backhaul ($N_{total,directos,s}^{backhaul} = 3 \text{ GrRBs}$), el algoritmo solo será capaz de asegurar $N_{total,directos,s}^{backhaul}$. Por el contrario, si el número de RBs que debería recibir el sector en las subtramas backhaul es inferior a $N_{total,directos,s}^{backhaul}$, el algoritmo garantizará que el sector recibe todos los RBs

requeridos. De tal forma que, de los tres GrRBs inicialmente planificados para los enlaces directos de cada sector en las subtramas backhaul (Figura 5.5), el algoritmo puede asignar RBs a los enlaces backhaul de los RNs de ese sector, pero siempre garantizando que al menos quedan $NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$ RBs disponibles para los enlaces directos.

$$NRB_{est,directos,s}^{backhaul} = \min\left(\max\left(NRB_{est,directos,s} - N_{total,s}^{acceso}, 0\right), N_{total,directos,s}^{backhaul}\right) \quad (5.40)$$

Paso 1: En la primera ronda, el algoritmo asigna los RBs del grupo primario (denominado P_r y representado mediante un círculo amarillo con línea discontinua en la Figura 5.5) a cada RN r de la celda, hasta que se alcanzan los RBs que debería recibir el RN ($NRB_{est,backhaul,r}$), o hasta que se han asignado al enlace backhaul del RN r todos los RBs pertenecientes a su P_r .

Paso 2: Si quedan RBs sin asignar pertenecientes a los GrRBs primarios, se lleva a cabo una segunda ronda, en la que el algoritmo intenta asignar esos RBs libres a aquellos RNs de la celda que aún no han alcanzado los RBs que deberían recibir. En esta segunda ronda se intentan asignar RBs pertenecientes al grupo primario de un RN, al enlace backhaul de otro RN diferente que aún no ha alcanzado $NRB_{est,backhaul,r}$. Por lo tanto, las asignaciones de RBs a los enlaces backhaul deben satisfacer las restricciones de ICIC recopiladas en la Tabla 5.6 y la Tabla 5.7.

Paso 3: El algoritmo asigna los RBs del grupo secundario (denominado S_r y representado mediante un círculo rosa con línea continua en la Figura 5.5) a cada RN r de la celda, hasta que se alcanzan los RBs que debería recibir el RN ($NRB_{est,backhaul,r}$), o hasta que se han asignado al enlace backhaul del RN r todos los RBs pertenecientes a su S_r . El S_r de los RNs pares es un GrRB inicialmente planificado para los enlaces directos de su sector, por lo que el algoritmo asignará RBs de este grupo al enlace backhaul del RN r , pero siempre garantizando que al menos quedan $NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$ RBs disponibles para los enlaces directos del sector.

Paso 4: Si quedan RBs sin asignar pertenecientes a los GrRBs secundarios, el algoritmo intenta asignar esos RBs libres a aquellos RNs de la celda que aún no han alcanzado los RBs que deberían recibir. De forma similar al paso 2, el algoritmo intenta asignar RBs pertenecientes al grupo secundario de un RN, al enlace backhaul de otro RN diferente que aún no ha alcanzado $NRB_{est,backhaul,r}$, por lo que todas las asignaciones de RBs deben satisfacer las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7). Además, las asignaciones también garantizan que queden suficientes RBs libres en los GrRBs inicialmente planificados para los enlaces directos para satisfacer $NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$.

Paso 5: Si aún quedan RNs que no han alcanzado los RBs que deberían recibir para su enlace backhaul, el algoritmo trata de asignarles RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector, pero garantizando que al menos quedan $NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$ RBs disponibles para los enlaces directos, y satisfaciendo siempre las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7).

Paso 6: Si aún quedan RNs que no han alcanzado los RBs que deberían recibir para su enlace backhaul, y todavía quedan RBs disponibles, se inicia una renegociación. Si un RN r no puede recibir un determinado RB f , es porque este RB f ya ha sido asignado a una pareja de RNs opuestos, pudiendo haber sido asignado solo a uno de ellos o a los dos, y asignar el RB f al RN r no satisface las restricciones del esquema de ICIC. Por lo tanto, el algoritmo intenta reasignar a esa pareja de RNs opuestos en algún RB disponible que satisfaga las restricciones del esquema de ICIC. Y si la reasignación es posible, se asigna el RB f al RN r .

Paso 7: Si algún RN todavía no ha alcanzado los RBs que debería recibir para su enlace backhaul, el algoritmo intenta asignarle RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su sector adyacente. Las asignaciones deben satisfacer las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7), por lo que estas asignaciones de RBs inicialmente planificados para los enlaces directos del sector adyacente no introducen interferencia adicional sobre los enlaces backhaul ya asignados. Por otro lado, de cara a calcular si el RN ya ha recibido todos los RBs que debería ($NRB_{est,backhaul,r}$), el algoritmo tiene en cuenta la degradación en la SINR que sufrirá el RN que recibe estos RBs, debido al mayor nivel de interferencia que recibirá de su sector adyacente.

Paso 8: Inicialmente se han definido tres GrRBs para los enlaces directos de cada sector. Con el objetivo de maximizar la cantidad de recursos frecuenciales que se asignan a los enlaces directos, en este paso el algoritmo intenta que los RBs de estos grupos no sean asignados a los enlaces backhaul de los RNs del sector, siempre que sea posible. Por lo tanto, si algún RB inicialmente planificado para los enlaces directos ha sido asignado a un RN del sector, y todavía quedan RBs disponibles, se aplican las dos siguientes fases, para tratar de liberar los RBs planificados para los enlaces directos, reasignando a esos RNs en otros RBs disponibles:

8.a) Para aquellos RNs que hayan recibido RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de su propio sector, el algoritmo intenta asignarles RBs disponibles pertenecientes a los GrRBs planificados para los enlaces directos de su sector opuesto. Si estos RBs no pueden ser asignados al RN por no satisfacer las restricciones del esquema de ICIC, el algoritmo lleva a cabo una renegociación, como en el paso 6. Si la asignación es posible, el RB planificado

para los enlaces directos se libera, y el enlace backhaul del RN se asigna en el nuevo RB.

8.b) Si tras aplicar la fase 8.a todavía hay RBs inicialmente planificados para los enlaces directos de un sector que han sido asignados al enlace backhaul de un RN del sector, y quedan RBs disponibles, el algoritmo intenta asignar a estos RNs RBs pertenecientes a los GrRBs planificados para los enlaces directos de su sector adyacente. De forma similar al paso 7, estas asignaciones deben satisfacer las restricciones del esquema de ICIC y, por lo tanto, no introducen interferencia adicional sobre los enlaces backhaul ya asignados. Además, el cambio de RBs solo es válido si la asignación del enlace backhaul que se está considerando no se degrada. Es decir, el cambio de RBs solo se acepta si teniendo en cuenta la degradación en la SINR que sufrirá el RN al utilizar RBs planificados para su sector adyacente, se sigue satisfaciendo la capacidad que se ha estimado que debería recibir, o al menos, se alcanza una capacidad igual o superior a la alcanzada antes de realizar el cambio de RBs.

Paso 9: Una vez que se han asignado los RBs a los enlaces backhaul de los RNs de la celda, se asignan a los enlaces directos de cada sector aquellos RBs que pertenecen a los GrRBs inicialmente planificados para ese sector (Figura 5.5) que no hayan sido asignados al enlace backhaul de ninguno de los dos RNs del sector.

Una vez que acaba el algoritmo, se dispone de los RBs asignados a los enlaces directos de cada sector y al enlace backhaul de cada RN para las subtramas backhaul. El esquema dinámico de RA se lleva a cabo para cada DeNB de forma independiente. Merece la pena destacar que a medida que va avanzando el algoritmo, se prioriza la asignación de RBs a aquellos RNs cuyo cociente entre los RBs que ya ha recibido y los RBs que debería recibir es menor.

Respecto a los enlaces directos, la incorporación de reuso frecuencial intra-celular degrada las condiciones de interferencia observadas por los mUEs. No obstante, como cada RB puede ser reutilizado un máximo de dos veces en el mismo DeNB, el scheduler tratará de asignar a los mUEs aquellos RBs en los que la interferencia intra-celular es más leve. Además, se ha comprobado en el capítulo anterior que el incremento en el reuso frecuencial propuesto por el esquema Back_op4 permite incrementar la disponibilidad de RBs para los enlaces directos, compensando la degradación de las condiciones de interferencia y compensando el overhead introducido por los enlaces backhaul. De la misma forma que en el esquema Back_op4, la asignación de recursos de los DeNBs en las subtramas backhaul sigue la ordenación representada en la Figura 5.4, pero incorporando esquemas de reuso frecuencial intra-celular. De esta forma, un sector puede asignar a sus enlaces directos un RB planificado

para los enlaces directos de otro sector, pero solo cuando esta asignación no introduce interferencia intra-celular adicional. Es decir, siempre que se garantice que, si ese RB ha sido ya asignado a un enlace backhaul, el sector que lo quiere asignar (pese a que no pertenece a sus GrRBs prioritarios) es el sector opuesto del RN. Finalmente, y en línea con los esquemas estáticos de RA-ICIC propuestos en el capítulo anterior para las subtramas backhaul, el DeNB asigna la misma potencia de transmisión a todos los RBs, con el objetivo de ofrecer mejores condiciones de interferencia para los enlaces backhaul.

5.3.3 Criterio de selección de nodo

Si se sigue un esquema convencional, cuando un nuevo usuario necesita establecer una conexión RRC (Radio Resource Control) en la red, se podría esperar un criterio de selección de nodo basado en el nivel promedio de SINR que se espera recibir del sector de su DeNB y de los RNs del sector, asumiendo idealmente que la SINR puede ser derivada a partir de la RSRQ (Reference Signal Received Quality), o bien reportada directamente por el UE. De esta forma, los usuarios se conectarían preferiblemente al nodo del que reciben el mayor nivel de SINR, y, por lo tanto, al nodo que les permitiría alcanzar el mayor throughput por RB. Sin embargo, los criterios de selección de nodo que se basan exclusivamente en medidas de RSRP, RSRQ o SINR, sin tener en cuenta la distribución de carga entre los nodos, no permiten aprovechar al máximo los recursos frecuenciales disponibles. Esto es debido a que la tasa de datos efectiva que puede alcanzar un UE también depende de la disponibilidad de capacidad en el nodo que le va a dar servicio.

Por ello, en el criterio de selección de nodo que se propone en este capítulo, y que recibe el nombre de Load Balanced Cell Selection Method (LBCSM), si un UE recibe un nivel de SINR promedio superior a un umbral ($SINR_{TH}^{cand}$) de más de un nodo, se considera que el UE es candidato para ser conectado a cualquiera de estos nodos, sin necesidad de que sea al que proporciona el mejor nivel de SINR promedio, si esta selección de nodo alternativa proporciona una mayor satisfacción de los requisitos de QoS a nivel de enlace o un mayor aprovechamiento de los recursos frecuenciales a nivel global. Por ejemplo, si un usuario está conectado actualmente a un DeNB, pero el usuario también observa buenas condiciones de canal respecto a un RN cercano, y este RN dispone de suficientes recursos frecuenciales libres para satisfacer los requisitos de tráfico del usuario, quizás es más beneficioso que el usuario se conecte al RN. De esta forma, si las condiciones de canal del enlace backhaul del RN son mejores que las condiciones de canal que observa el usuario en su enlace directo con el DeNB, el consumo de recursos en el DeNB sería más bajo, y el usuario podría aprovecharse de los recursos libres que dispone el RN en sus enlaces de acceso.

Por otro lado, si un usuario recibe un mejor nivel de SINR promedio de un RN, pero el usuario es capaz de alcanzar una mayor tasa de datos si se conecta al DeNB, gracias a una mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces directos, también se considera el intercambio del nodo seleccionado. Hay que tener en cuenta que, en la mayoría de casos, las condiciones de canal de los enlaces directos son peores que las condiciones de canal de los enlaces backhaul, por lo tanto, desde el punto de vista del DeNB se consumen más recursos frecuenciales. Sin embargo, el usuario puede recibir mejores prestaciones del DeNB que del RN debido a una falta de recursos disponibles en los enlaces de acceso del RN.

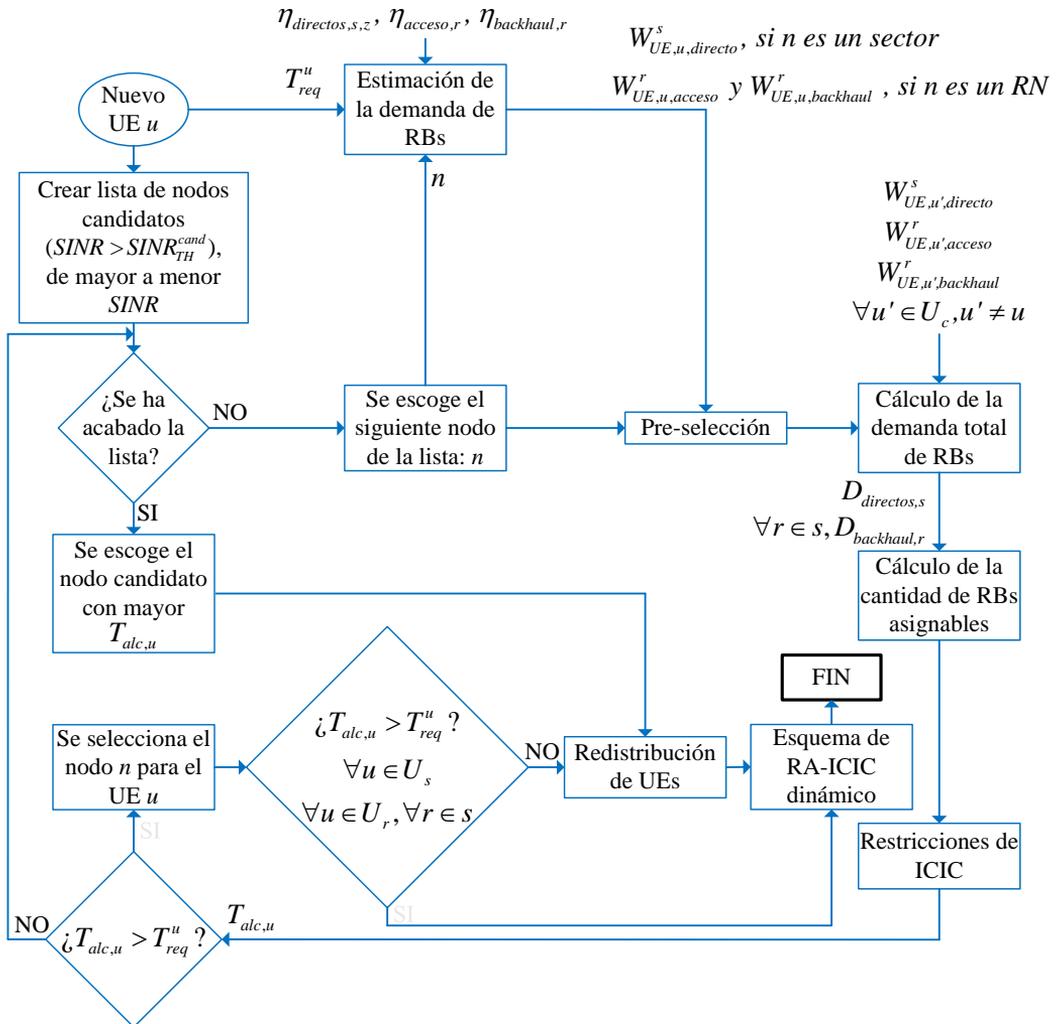


Figura 5.6: Diagrama de la operación del algoritmo completo

El criterio de selección de nodo que se propone en este capítulo incluye procesos potenciales de reasignación de nodo. Es decir, procesos en los que UEs que previamente estaban conectados a un nodo, pueden realizar un handover a otro nodo, ya sea un DeNB o un RN, con el objetivo de mejorar la utilización de los recursos frecuenciales, y de alcanzar mejores prestaciones. Sin embargo, antes de explicar en detalle los diferentes pasos del criterio de selección de nodo, es necesario describir primero cómo se obtiene la tasa de datos que un UE podría alcanzar en cada uno de los nodos que se consideran en la decisión de la selección de nodo. El cálculo de la tasa de datos alcanzable requiere estimar en primer lugar la cantidad de recursos que cada sector o RN tiene disponible para el UE, tras haber efectuado el reparto de recursos entre enlaces directos y enlaces backhaul. En la Figura 5.6 se representa el diagrama de la operación del algoritmo completo cuando un nuevo UE u intenta conectarse al sistema, englobando el esquema de RA dinámico y el criterio de selección de nodo.

5.3.3.1 Estimación de la demanda de RBs de los UEs

En primer lugar, se estima el consumo para cada usuario u , en términos del número de RBs necesarios para satisfacer su tasa de datos requerida (T_{req}^u), para cada uno de los enlaces potenciales involucrados en el acceso del usuario. Si un usuario u se va a conectar potencialmente al DeNB, se estima su consumo para el enlace directo del sector s que le da servicio ($W_{UE,u,directo}^s$). Por el contrario, si un usuario u se va a conectar potencialmente a un RN, se estima su consumo para el enlace backhaul ($W_{UE,u,backhaul}^r$) y para el enlace de acceso ($W_{UE,u,acceso}^r$) del RN r que le daría servicio. Dichas estimaciones de consumo, se obtienen para cada UE de la celda de acuerdo a las ecuaciones (5.41), (5.42) y (5.43), donde $\eta_{directos,s,z}$ es la eficiencia promedio por RB para los enlaces directos del sector s en la zona z de la celda, $\eta_{acceso,r}$ es la eficiencia promedio por RB para los enlaces de acceso del RN r , y $\eta_{backhaul,r}$ es la eficiencia promedio por RB para el enlace backhaul del RN r . Las eficiencias se calculan en términos de los bits promedio que se pueden transmitir en un RB.

$$W_{UE,u,directo}^s = \frac{T_{req}^u}{\eta_{directos,s,z}} \quad (5.41)$$

$$W_{UE,u,acceso}^r = \frac{T_{req}^u}{\eta_{acceso,r}} \quad (5.42)$$

$$W_{UE,u,backhaul}^r = \min \left(\frac{T_{req}^u}{\eta_{backhaul,r}}, \frac{T_{alc,u,acceso}^r}{\eta_{backhaul,r}} \right) \quad (5.43)$$

Respecto a la estimación del consumo de RBs en el enlace backhaul de los RNs ($W_{UE,u,backhaul}^r$) mostrada en la ecuación (5.43), se está considerando también la tasa de datos promedio que se estima que el usuario u sería capaz de alcanzar en su enlace de acceso con el RN r ($T_{alc,u,acceso}^r$). En situaciones en las que la carga de tráfico de un RN es alta, las estimaciones de la tasa de datos que podría alcanzar cada rUE en los enlaces de acceso podrían ser inferiores a las tasas de datos requeridas por los rUEs. Por ello, en la estimación del consumo de los UEs en el enlace backhaul se considera también $T_{alc,u,acceso}^r$ como factor corrector. De esta forma se intenta ajustar la capacidad de los enlaces backhaul a la capacidad agregada alcanzada en los enlaces de acceso, con el objetivo de no desperdiciar recursos frecuenciales en los enlaces backhaul cuando los enlaces de acceso de los RNs están sobrecargados, y no son capaces de transmitir todos los paquetes de datos recibidos en su enlace backhaul. Cómo se calcula la tasa de datos promedio alcanzable por los usuarios en sus enlaces de acceso ($T_{alc,u,acceso}^r$) se explica en detalle posteriormente.

Como se ve en las ecuaciones (5.41), (5.42) y (5.43), en lugar de considerar una estimación de la eficiencia por RB para cada UE, teniendo en cuenta sus condiciones de canal de manera individual, se considera una eficiencia promedio para los UEs que están conectados a un mismo RN, o para los UEs que pertenecen a la misma zona (zonas 0, 1 y 2 representadas en la Figura 3.9) de cada sector. Hay que tener en cuenta que el scheduler puede asignar los RBs con menores niveles de interferencia a aquellos UEs que observan malas condiciones de canal, con el objetivo de satisfacer sus requisitos de QoS. Por el contrario, el scheduler puede asignar los RBs que reciben mayores niveles de interferencia a los UEs que observan buenas condiciones de canal, obteniéndose una eficiencia por RB más baja que la eficiencia alcanzable que podría estimarse teniendo en cuenta sus buenas condiciones de canal. Por lo tanto, una estimación de la eficiencia individualizada para cada UE podría ser optimista para algunos usuarios y, al mismo tiempo, pesimista para otros usuarios. Sin embargo, calcular la eficiencia promedio de los UEs que se encuentran en la misma zona permite estimar el consumo agregado de RBs de los UEs conectados a un nodo de una manera más realista, teniendo en cuenta el reparto de los recursos frecuenciales disponibles entre los diferentes UEs.

Las eficiencias promedio se estiman empleando una ventana de promediado deslizante, de tal forma que en cada subtrama se añade la eficiencia por RB alcanzada en ese TTI, y se elimina la muestra más antigua. Así se va estimando y actualizando la eficiencia promedio por RB alcanzada en las últimas subtramas. Respecto a las eficiencias promedio por RB para los enlaces directos se obtiene una eficiencia promedio independiente para cada sector y además, para cada zona del sector ($\eta_{directos,s,z}$). De esta forma se puede estimar de forma

más precisa la eficiencia observada por cada UE, en función de su ubicación en la celda, y en función de su sector. En el caso de los enlaces de acceso se obtiene una única eficiencia promedio para cada RN ($\eta_{acceso,r}$), ya que el área de cobertura de los RNs es mucho más limitada que el área de cobertura de los DeNBs.

5.3.3.2 Estimación de la tasa de datos alcanzable por cada UE considerando el reparto de los recursos frecuenciales entre los UEs

En este subapartado se explica cómo se obtiene la tasa de datos promedio alcanzable por cada UE, tanto si se conecta directamente al DeNB, como si se conecta a través de un RN. La tasa de datos alcanzable por los UEs da soporte al criterio de selección de nodo, y para su obtención se considera el reparto de los recursos frecuenciales entre los UEs. Se puede estimar la tasa de datos alcanzable, teniendo en cuenta la distribución de recursos frecuenciales entre los diferentes enlaces y considerando que la asignación de recursos a cada UE es proporcional a su demanda. A continuación, se detallan los pasos que se llevan a cabo para estimar la tasa de datos alcanzable por los usuarios.

A. Obtención de la demanda total de recursos frecuenciales para cada nodo

La demanda total de RBs para los enlaces directos de cada sector s de la celda ($D_{directos,s}$), o para el enlace backhaul de cada RN r de la celda ($D_{backhaul,r}$), se calcula agregando la demanda de RBs de los UEs que están conectados a cada nodo, tal y como se muestra en la ecuación (5.44). Además, la demanda total de RBs del DeNB (D_{DeNB}) puede obtenerse agregando las demandas de RBs de los enlaces directos de todos los sectores del DeNB y de los enlaces backhaul de todos los RNs del DeNB. U_s es el conjunto de usuarios de la celda conectados al sector s , y U_r es el conjunto de usuarios de la celda conectados al RN r .

$$\begin{aligned}
 D_{directos,s} &= \sum_{\forall u \in U_s} W_{UE,u,directo}^s \\
 D_{backhaul,r} &= \sum_{\forall u \in U_r} W_{UE,u,backhaul}^r \\
 D_{DeNB} &= \sum_{\forall s \in DeNB} \sum_{\forall u \in U_s} W_{UE,u,directo}^s + \sum_{\forall r \in DeNB} \sum_{\forall u \in U_r} W_{UE,u,backhaul}^r
 \end{aligned} \tag{5.44}$$

B. Cálculo de la cantidad de RBs asignables para cada enlace

El siguiente paso es estimar la cantidad de RBs que deberían recibir los enlaces directos de cada sector s ($NRB_{est,directos,s}$), y la cantidad de RBs que debería recibir el enlace backhaul de cada RN r ($NRB_{est,backhaul,r}$), en función de las demandas de RBs obtenidas en el paso anterior (paso A). Las estimaciones de la cantidad de RBs que debería recibir cada enlace se utilizan en el criterio de selección de nodo como la cantidad de RBs que dispone cada enlace para sus

asignaciones. Además, estas estimaciones son los parámetros de entrada del esquema de RA dinámico explicado en el subapartado 5.3.2.

Si los recursos frecuenciales disponibles en el sistema ($N_{total,c}$) son suficientes para satisfacer las demandas de RBs de todos los nodos de la celda, no es necesario asignar a los enlaces backhaul de los RNs una cantidad de RBs superior a su demanda. Por lo tanto, se puede asignar al enlace backhaul de cada RN r su demanda de RBs ($D_{backhaul,r}$), y distribuir el resto de RBs disponibles a los enlaces directos de los diferentes sectores de la celda, de forma proporcional a sus demandas de RBs ($D_{directos,s}$), tal y como se muestra en la ecuación (5.45).

$$NRB_{est,backhaul,r} = D_{backhaul,r}$$

$$NRB_{est,directos,s} = \frac{D_{directos,s}}{\sum_{\forall s \in DeNB} D_{directos,s}} \cdot \left(N_{total,c} - \sum_{\forall r \in DeNB} D_{backhaul,r} \right) \quad (5.45)$$

$$Si D_{DeNB} < N_{total,c}, \forall r \in DeNB, \forall s \in DeNB$$

Por el contrario, si la demanda de RBs de todos los nodos de la celda (D_{DeNB}) es superior a los RBs disponibles en el sistema, los recursos disponibles se distribuyen de forma proporcional a la demanda de recursos de cada nodo. Para ello se calculan en primer lugar las demandas de RBs normalizadas para cada sector s ($\beta_{directos,s}$) y para cada RN r ($\beta_{backhaul,r}$), tal y como se muestra en la ecuación (5.46). Posteriormente se realiza el reparto de los recursos frecuenciales disponibles de forma proporcional a las demandas de RBs normalizadas de cada nodo (5.47).

$$\beta_{directos,s} = \frac{D_{directos,s}}{D_{DeNB}} \quad (5.46)$$

$$\beta_{backhaul,r} = \frac{D_{backhaul,r}}{D_{DeNB}}$$

$$NRB_{est,backhaul,r} = \beta_{backhaul,r} \cdot N_{total,c}$$

$$NRB_{est,directos,s} = \beta_{directos,s} \cdot N_{total,c} \quad (5.47)$$

$$Si D_{DeNB} \geq N_{total,c}, \forall r \in DeNB, \forall s \in DeNB$$

En ambas situaciones esta sería la distribución de recursos óptima, sin embargo, es necesario tener en cuenta las restricciones del esquema de ICIC, por lo que no siempre es posible garantizar esta distribución de recursos óptima.

C. Ajuste de la cantidad de RBs asignables para cada enlace aplicando las restricciones impuestas por el esquema de ICIC

En este paso se ajusta la distribución de recursos óptima obtenida mediante la ecuación (5.45) o la ecuación (5.47) para que satisfaga las restricciones impuestas por el esquema de ICIC, recopiladas en la Tabla 5.8. Respecto a las restricciones a nivel de celda, $N_{total,c}$ representa el total de RBs disponibles en el sistema agrupando los RBs disponibles en las subtramas de acceso ($N_{total,c}^{acceso}$) y los RBs disponibles en las subtramas backhaul ($N_{total,c}^{backhaul}$), ya que para considerar todos los enlaces en el criterio de selección de nodo, y en el ajuste dinámico del reparto de recursos frecuenciales es necesario considerar de forma conjunta ambos tipos de subtramas. En el caso de las subtramas de acceso, el esquema de RA-ICIC es fijo y es el que se representa en la Figura 5.4, de tal forma que todos los RBs del sistema (9 GrRBs) están disponibles para los enlaces directos ($N_{total,c}^{acceso}$). En las subtramas backhaul se considera que un RB puede ser asignado un máximo de dos veces en cada DeNB, pero no se permite que un RB se asigne de forma simultánea en los enlaces directos de dos sectores pertenecientes al mismo DeNB. Por ello, cada celda dispone de un total de 18 GrRBs en las subtramas backhaul ($N_{total,c}^{backhaul}$), y los enlaces directos ($N_{total,directos,c}^{backhaul}$) están además limitados a 9 GrRBs. Respecto a los enlaces de acceso de los RNs, el esquema de RA-ICIC aplicado en las subtramas de acceso es fijo, asignándose 3 GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN ($NRB_{est,acceso,r} = N_{total,acceso,r}$).

En cuanto a las restricciones a nivel de sector, en las subtramas de acceso se asignan 3 GrRBs a los enlaces de acceso de cada RN (Figura 5.4), y como se evita que los recursos planificados para los enlaces directos de un sector sean los mismos que los planificados para los enlaces de acceso de los RNs del sector, los recursos disponibles para los enlaces directos de cada sector quedan limitados a 3 GrRBs ($NRB_{est,directos,s}^{acceso} = N_{total,s}^{acceso}$). En las subtramas backhaul se podría llegar a asignar todo el ancho de banda del sistema (9 GrRBs) a los enlaces directos y enlaces backhaul de un sector ($N_{total,s}^{backhaul}$). En la Figura 5.5 se definen los 3 GrRBs que se planifican inicialmente para los enlaces directos de cada sector, y de acuerdo al esquema de RA dinámico explicado en el subapartado 5.3.2, el número máximo de RBs que pueden asignarse a los enlaces directos de cada sector en las subtramas backhaul se limita a 3 GrRBs ($N_{total,directos,s}^{backhaul}$). No obstante, los enlaces directos pueden ser asignados en ambos tipos de subtrama, por lo que los RBs que se estima que deberían recibir los enlaces directos de cada sector son repartidos entre ambos tipos de subtrama ($NRB_{est,directos,s}^{acceso}$ y $NRB_{est,directos,s}^{backhaul}$) de acuerdo con la ecuación (5.48). Además, aunque se definen GrRBs prioritarios para los enlaces directos de cada sector, se aplica la ordenación representada en la Figura 5.4, de tal forma que un sector puede asignar a sus mUEs en RBs planificados para los enlaces directos de otro sector si es necesario.

$$NRB_{est,directos,s} = NRB_{est,directos,s}^{acceso} + NRB_{est,directos,s}^{backhaul} \quad (5.48)$$

- Restricciones a nivel de celda:

c1. $N_{total,c} = N_{total,c}^{acceso} + N_{total,c}^{backhaul}$, $N_{total,c}^{acceso} = 9 \text{ GrRBs}$, $N_{total,c}^{backhaul} = 18 \text{ GrRBs}$

c2. $N_{total,directos,c}^{backhaul} = 9 \text{ GrRBs}$, $N_{total,acceso,r} = 3 \text{ GrRBs}$

c3. $\sum_{\forall s \in DeNB} NRB_{est,directos,s}^{acceso} = N_{total,c}^{acceso}$

c4. $NRB_{est,acceso,r} = N_{total,acceso,r}$

c5. $\sum_{\forall s \in DeNB} NRB_{est,directos,s}^{backhaul} \leq N_{total,directos,c}^{backhaul}$

c6. $\left(\sum_{\forall s \in DeNB} NRB_{est,directos,s}^{backhaul} + \sum_{\forall r \in DeNB} NRB_{est,backhaul,r} \right) \leq N_{total,c}^{backhaul}$

- Restricciones a nivel de sector:

s1. $N_{total,s}^{acceso} = 9 \text{ GrRBs} - \sum_{\forall r \in s} NRB_{est,acceso,r}$, $N_{total,s}^{backhaul} = 9 \text{ GrRBs}$

s2. $N_{total,directos,s}^{backhaul} = 3 \text{ GrRBs}$

s3. $NRB_{est,directos,s}^{acceso} = N_{total,s}^{acceso}$

s4. $NRB_{est,directos,s}^{backhaul} \leq N_{total,directos,s}^{backhaul}$

s5. $NRB_{est,directos,s}^{backhaul} + \sum_{\forall r \in s} NRB_{est,backhaul,r} \leq N_{total,s}^{backhaul}$

Tabla 5.8: Restricciones de ICIC para la distribución de recursos frecuenciales

Por lo tanto, sobre la distribución de recursos óptima calculada mediante la ecuación (5.45) o la ecuación (5.47) se aplican las restricciones impuestas por el esquema de ICIC recopiladas en la Tabla 5.8. Si la estimación óptima de la cantidad de RBs que debería recibir un enlace no satisface alguna de las restricciones de ICIC, esa estimación de recursos se ajusta a la máxima cantidad de RBs que permite satisfacer todas las restricciones de ICIC. Los RBs sobrantes de este enlace se reparten entre el resto de enlaces de la celda de forma proporcional a las demandas de recursos. De esta forma se ajustan las estimaciones del número de RBs que recibe cada nodo ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), y las estimaciones ajustadas son las que se usan en el siguiente paso del criterio de selección de nodo (paso D) y las que se utilizan como parámetros de entrada para el esquema de RA dinámico.

D. Estimación de la tasa de datos alcanzable por cada UE

Una vez que se han obtenido las estimaciones del número de RBs que debería recibir cada nodo satisfaciendo las restricciones impuestas por el esquema de ICIC, se estima la tasa de datos promedio que cada UE puede alcanzar en su nodo. Para el cálculo de estas estimaciones se considera que cada nodo tiene disponibles para sus asignaciones la cantidad de RBs que se ha estimado que debería recibir ($NRB_{est,directos,s}$, $NRB_{est,acceso,r}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), y que las asignaciones de recursos a los UEs son proporcionales a la demanda de recursos de cada uno, como se muestra en las ecuaciones (5.49), (5.50) y (5.51).

$$T_{alc,u,directo}^s = \frac{W_{UE,u,directo}^s}{\sum_{\forall u' \in U_s} W_{UE,u',directo}^s} \cdot NRB_{est,directos,s} \cdot \eta_{directos,s,z} \quad (5.49)$$

$$T_{alc,u,acceso}^r = \frac{W_{UE,u,acceso}^r}{\sum_{\forall u' \in U_r} W_{UE,u',acceso}^r} \cdot NRB_{est,acceso,r} \cdot \eta_{acceso,r} \quad (5.50)$$

$$T_{alc,u,backhaul}^r = \frac{W_{UE,u,backhaul}^r}{\sum_{\forall u' \in U_r} W_{UE,u',backhaul}^r} \cdot NRB_{est,backhaul,r} \cdot \eta_{backhaul,r} \quad (5.51)$$

Finalmente, la tasa de datos promedio que se estima que el usuario u sería capaz de alcanzar ($T_{alc,u}$) se obtiene de la siguiente forma, en función de si el usuario está conectado a un DeNB o a un RN:

- Si el UE u está conectado al sector s del DeNB: $T_{alc,u} = T_{alc,u,directo}^s$
- Si el UE u está conectado al RN r : $T_{alc,u} = \min(T_{alc,u,acceso}^r, T_{alc,u,backhaul}^r)$

Cuando la demanda total de recursos frecuenciales de todos los nodos de la celda (D_{DeNB}) es inferior a los recursos disponibles en el sistema, se ha comentado anteriormente que no es necesario asignar a los enlaces backhaul de los RNs una cantidad de RBs superior a su demanda. Por lo tanto, una vez que el scheduler del DeNB ha asignado todos los paquetes de datos dirigidos a sus RNs, si han quedado sin asignar RBs inicialmente reservados para los enlaces backhaul, estos RBs pueden ser asignados a los enlaces directos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que siempre se necesita asignar una cantidad mínima de recursos frecuenciales a cada enlace backhaul. Para dar soporte al scheduling de recursos en los despliegues de relays, se ha definido un nuevo canal de control físico (R-PDCCH: Relay Physical Downlink Control Channel) en LTE-A (Figura 4.2) para transportar las asignaciones de scheduling para los RNs en el R-PDSCH (Relay Physical Downlink Shared Channel). El R-PDCCH se mapea

en un subconjunto de la asignación de RBs del enlace backhaul de cada RN, mientras que los RBs restantes son los que se pueden ajustar adaptativamente. Por lo tanto, siempre se asigna a cada enlace backhaul una cantidad mínima de RBs en los que se mapea el R-PDCCH.

5.3.3.3 Criterio de selección de nodo (LBCSM)

Una vez que se ha visto cómo se estima la tasa de datos promedio que un UE podría llegar a alcanzar si se conecta a un determinado nodo, que da soporte a la hora de decidir a qué nodo deberían conectarse los UEs, en este subapartado se detallan los principales pasos del criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM). En la primera fase, cuando un nuevo UE accede a la red se estima el nivel de SINR promedio que recibe de los nodos que se consideran en el proceso de selección, que son el sector del DeNB al que pertenece, y los RNs desplegados en ese sector. De tal forma que se obtiene el conjunto de nodos de los que el nuevo UE recibe un nivel estimado de SINR superior al umbral ($SINR_{TH}^{cand}$), y dentro de este conjunto de nodos se tratará de seleccionar el que proporcione la mejor utilización de la capacidad de la celda. Así, si alguno de esos nodos satisface los requisitos de QoS del tráfico cursado por el UE se selecciona el que mejor nivel de SINR proporciona. Por el contrario, si los requisitos de QoS del UE no se satisfacen con los nodos candidatos, se puede llevar a cabo un proceso de redistribución de usuarios, cuyo objetivo principal es distribuir la carga de tráfico entre los nodos para mejorar las prestaciones del sistema, y para tratar de proporcionar prestaciones similares a todos los UEs de la celda.

A. Fase inicial de selección de nodo

Cuando un nuevo usuario u intenta conectarse a la red se estima el nivel de SINR promedio que observaría si se conectase directamente a su sector del DeNB y el que observaría si se conectase a través de alguno de los dos RNs de su sector. De esta forma se obtiene la lista de nodos para los que el UE es candidato a conectarse, que serán aquellos nodos cuya estimación del nivel de SINR supera el umbral $SINR_{TH}^{cand}$. Para cada uno de estos nodos potenciales se obtiene la tasa de datos promedio que el UE podría alcanzar si se conecta a dicho nodo, de acuerdo al cálculo descrito en el subapartado 5.3.3.2. Si alguno de los nodos potenciales es capaz de garantizar la tasa requerida por el UE (T_{req}^u), el nuevo UE se conectará al nodo que garantice T_{req}^u y que ofrezca el mejor nivel de SINR estimada.

Por el contrario, si ninguno de los nodos potenciales puede garantizar la tasa requerida por el UE u , o no se satisfacen los requisitos de tasa de datos de otros UEs, bajo ciertas limitaciones se puede incorporar una fase de redistribución al

criterio de selección de nodo, con el objetivo de tratar de redistribuir la carga de tráfico entre los diferentes nodos. En esta situación, el nuevo UE se conectaría al nodo que le proporciona una mayor $T_{alc,u}$, ya que esto equivaldría a seleccionar el nodo que está cursando la carga de tráfico más baja, no obstante, se lleva a cabo la fase de redistribución, que se explica en detalle en el siguiente paso (paso B). Esta fase de redistribución de UEs solo se aplica en el sector al que pertenece el nuevo usuario, incluyendo los RNs desplegados en ese sector. En la Figura 5.6 puede verse el diagrama de flujo de la operativa del criterio de selección de nodo.

Por lo tanto, cuando un nuevo usuario accede a la red, podría llevarse a cabo un proceso de redistribución de usuarios si no se satisfacen los requisitos de tráfico. Además de estos procesos de redistribución cuando nuevos usuarios acceden a la red, la fase de redistribución de usuarios también se lleva a cabo de forma periódica, y en estos casos, el proceso de redistribución se aplica en el DeNB completo, es decir, en todos los sectores del DeNB. Cuando un nuevo UE se conecta a la red, si se satisfacen los requisitos de tráfico de los UEs no se aplica el proceso de redistribución. Y si no se satisfacen, el proceso de redistribución de UEs se limita solo al sector al que pertenece el nuevo UE. El objetivo de limitar los procesos de redistribución de usuarios que se llevan a cabo cuando un nuevo UE se conecta a la red, es evitar cambios de nodos constantes y minimizar la señalización que conllevan los procesos de handover de los UEs, a pesar de que la distribución de tráfico, y la distribución de recursos, se podrían optimizar si el proceso se realizase a nivel de celda. Sin embargo, sí que se aplica la redistribución de UEs a la celda completa de forma periódica, pero considerando periodos de tiempo más largos. De esta forma se trata de alcanzar una distribución de carga más eficiente entre los diferentes nodos de la celda. Así, en situaciones de baja carga, en las que los sectores y los RNs son capaces de satisfacer los requisitos de tráfico de sus usuarios, los procesos de redistribución de UEs periódicos permiten balancear la distribución de carga, con el objetivo de que todos los usuarios obtengan prestaciones similares, sin importar si están conectados directamente al DeNB o si se conectan a través de un RN.

B. Fase de redistribución de usuarios

La fase de redistribución de UEs se basa en el algoritmo que se describe en pseudo-código en la Tabla 5.9. Al comienzo del algoritmo se ordenan los nodos a considerar de menor a mayor nivel de satisfacción de las tasas de datos requeridas por los UEs, y se selecciona el nodo que alcanza una menor satisfacción, ya que es el nodo que está más sobrecargado. El algoritmo intenta transferir un UE de este nodo (nodo n), al nodo que ofrece el mayor nivel de satisfacción a sus UEs (nodo n^*). Si la fase de redistribución se lleva a cabo

porque un nuevo UE se ha conectado a la red, el conjunto de nodos que se considera está limitado al sector del DeNB al que pertenece el nuevo UE y a los RNs desplegados en ese sector. Mientras que, si se trata de un proceso de redistribución periódico, se consideran todos los nodos de la celda. Si el nodo n es un sector del DeNB, el algoritmo intenta transferir un UE, que actualmente está conectado al sector, al RN del sector que ofrece el mayor nivel de satisfacción de las tasas de datos requeridas. Si no es posible transferir ningún UE del sector a este RN, el algoritmo lo intenta con el otro RN del sector siguiendo el orden. El caso contrario sería que el nodo n sea un RN, y en este caso el algoritmo intenta transferir un UE del RN al sector del DeNB.

Para seleccionar el UE que podría realizar el intercambio de nodo se comienza con los UEs que actualmente están conectados al nodo n , pero que reciben un mayor nivel de SINR del nodo n^* , que de su nodo n . Estos UEs recibirían mejores niveles de SINR del nodo n^* , y, además, el nodo n^* ofrece un mayor nivel de satisfacción de las tasas de datos requeridas, por lo que los UEs recibirían mejores tasas de datos conectándose al nodo n^* . Por lo tanto, si se encuentra algún UE que satisface estas condiciones, de entre todos ellos se intentará traspasar al nodo n^* al UE que recibe el menor nivel de SINR del nodo n . Por el contrario, si no se encuentra ningún UE que satisfaga estas condiciones, el algoritmo busca los UEs actualmente conectados al nodo n , que son candidatos a conectarse al nodo n^* , es decir, que reciben un nivel de SINR del nodo n^* superior al umbral $SINR_{TH}^{cand}$. Estos UEs reciben niveles de SINR más bajos del nodo n^* que de su nodo actual n , sin embargo, serían capaces de recibir tasas de datos mayores del nodo n^* , gracias a una mayor disponibilidad de recursos frecuenciales. El algoritmo intenta traspasar en primer lugar al UE que recibe el mayor nivel de SINR del nodo n^* .

Una vez que se selecciona el UE que se va a intentar traspasar al nodo n^* , se comprueba si el intercambio de nodo satisface las condiciones necesarias. En primer lugar, es necesario actualizar la estimación del consumo de RBs del UE que se quiere transferir para sus nuevos enlaces (ecuaciones (5.41), (5.42) y (5.43)). Posteriormente, se estima la distribución de recursos deseada teniendo en cuenta este posible intercambio de nodo, y considerando las restricciones del esquema de ICIC, y se actualizan las estimaciones de la tasa de datos promedio alcanzable por cada UE (ecuaciones (5.49), (5.50) y (5.51)). Con el objetivo de evitar efectos ping-pong, solo se valida el intercambio de nodo del UE si la estimación de la tasa de datos alcanzable en el nodo n^* , supera en un cierto porcentaje (P_{TH}^{interc}) a la tasa de datos alcanzable en su nodo actual n antes de considerar el intercambio. Por lo tanto, si la estimación de la tasa de datos alcanzable en el nodo n^* no supera el P_{TH}^{interc} , el intercambio de nodo se descarta.

Inicialización: $N =$ Conjunto de nodos a considerar
 $intercambio = true$

while ($intercambio$)

$intercambio = false$

$ordenar(N)$: Se ordenan los nodos de menor a mayor S_{alc}

for $n = 1$ to $length(N)$

$n^* =$ Se selecciona el nodo con mayor S_{alc}

$U =$ Conjunto de UEs conectados a n , candidatos a conectarse a n^*

$ordenar(U)$: En primer lugar, los UEs para los que $SINR_{n^*} > SINR_n$ (de menor a mayor $SINR_n$). Después, el resto de UEs candidatos (de mayor a menor $SINR_{n^*}$)

for $u = 1$ to $length(U)$

Obtener $T_{alc}^{n^*}$ y m_{n^*}

if ($(T_{alc}^{n^*} > (1 + P_{TH}^{interc}) \cdot T_{alc}^n)$ and $(m_{n^*} < m_n)$) **then**

El UE u es traspasado al nodo n^*

$intercambio = true$

Volver al comienzo del **while**

else

Descartar el intercambio de nodo

end if

end for

end for

end while

Se define: $S_{alc} =$ Nivel de satisfacción de las tasas de datos requeridas (T_{req}^u)

$SINR_n =$ Nivel de SINR promedio recibido del nodo n

$SINR_{n^*} =$ Nivel de SINR promedio recibido del nodo n^*

$T_{alc}^n =$ Estimación de la tasa de datos alcanzable en el nodo n

$T_{alc}^{n^*} =$ Estimación de la tasa de datos alcanzable en el nodo n^*

$m_n =$ Valor de la métrica m si el UE permanece conectado al nodo n

$m_{n^*} =$ Valor de la métrica m si el UE es transferido al nodo n^*

Tabla 5.9: Pseudo-código de la fase de redistribución de UEs

Además de comprobar que la mejora de la tasa de datos alcanzable por el UE es superior al umbral (P_{TH}^{interc}), también se comprueba una segunda condición, que intenta medir si el intercambio de nodo del UE es beneficioso a nivel de sistema, de acuerdo a la métrica (m) representada en la ecuación (5.52). J es el índice de Jain, y de la misma forma que en [62], se utiliza para evaluar la equitatividad en las tasas de datos alcanzables ($T_{alc,u}$) por todos los UEs de la celda. $|U_c|$ permite obtener la cardinalidad del conjunto, de tal forma que equivale al número total

de UEs de la celda (incluyendo tanto mUEs como rUEs). El rango de valores que puede tomar el índice de Jain es $[1/|U_c|, 1]$, siendo 1 el mejor caso, en el que todos los UEs observarían la misma tasa de datos alcanzable. El segundo factor de la métrica evalúa el nivel de satisfacción de las tasas de datos requeridas por los UEs (T_{req}^u), y cuanto menor sea este factor, mejor es el nivel de satisfacción. De esta forma, la métrica busca que se asignen tasas de datos similares a todos los UEs de la celda, así como que se satisfagan los requisitos de QoS de los UEs.

$$m = (1 - J) \cdot \sum_{\forall u \in U_c} \frac{\max(T_{req}^u - T_{alc,u}, 0)}{T_{req}^u} \quad (5.52)$$

$$J = \frac{\left(\sum_{\forall u \in U_c} T_{alc,u} \right)^2}{|U_c| \cdot \sum_{\forall u \in U_c} (T_{alc,u})^2}$$

Por lo tanto, si la tasa de datos que se estima que alcanzaría el UE en el nodo n^* supera el umbral P_{TH}^{interc} , y el valor de la métrica m se reduce al considerar el intercambio de nodo, el algoritmo valida el intercambio y el UE seleccionado será transferido al nodo n^* . Por el contrario, si alguna de las dos condiciones no se satisface, el algoritmo descarta el intercambio de nodo. La fase de redistribución de UEs finaliza cuando el algoritmo ha comprobado todos los nodos, y no se ha validado ningún intercambio de nodo.

Una vez que el criterio de selección de nodo termina, incluyendo el potencial proceso de redistribución de usuarios, se dispone de una distribución de recursos deseada ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$) que ha sido actualizada, y que se envía como parámetro de entrada al esquema de RA dinámico (subapartado 5.3.2). El esquema de RA dinámico actualizará la asignación de recursos a cada nodo, tratando de alcanzar la distribución deseada. En la Figura 5.6 puede verse el diagrama de flujo de la operación conjunta del criterio de selección de nodo y del esquema de RA-ICIC dinámico. En línea con la limitación del proceso de redistribución de usuarios al sector al que pertenece el nuevo UE, el ajuste del reparto de los recursos frecuenciales también se limita al sector. Es decir, que cuando un nuevo UE se conecta a la red solo se comprueba si es necesario ajustar el reparto de los recursos entre los enlaces directos del sector al que pertenece el nuevo UE y los enlaces backhaul de los RNs desplegados en el sector. Por lo tanto, en la estimación de la tasa de datos alcanzable por los UEs (subapartado 5.3.3.2) se respeta la cantidad de RBs asignados a los enlaces directos de los dos sectores restantes de la celda, y a los enlaces backhaul de los RNs desplegados en esos dos sectores. De forma similar, el esquema de RA-

ICIC dinámico (subapartado 5.3.2) se lleva a cabo garantizando que se respetan los RBs asignados a los enlaces directos de los dos sectores restantes, y los RBs asignados a los enlaces backhaul de los RNs desplegados en los dos sectores restantes. De esta forma se evita que los RBs asignados a cada nodo cambien con demasiada frecuencia.

Por otro lado, cuando se llevan a cabo los procesos de redistribución de UEs periódicos, sí que se comprueba si es necesario adaptar el reparto de recursos frecuenciales a nivel de celda completa, con el objetivo de optimizar el uso de los RBs disponibles, pero considerando periodos de tiempo más largos. Por lo tanto, una vez que el proceso de redistribución de UEs periódico finaliza, y se ha actualizado la distribución de recursos deseada ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), esta distribución se envía como parámetro de entrada al esquema de RA-ICIC dinámico, que asignará RBs a cada nodo con el objetivo de alcanzar la distribución más parecida posible a la deseada.

5.4 Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para el algoritmo propuesto, que combina el esquema dinámico de RA-ICIC y el criterio de selección de nodo. En primer lugar, se analizan las prestaciones del esquema dinámico de RA-ICIC bajo condiciones de demanda de tráfico heterogéneas, con el objetivo de evaluar si el esquema propuesto es capaz de distribuir los recursos frecuenciales entre los diferentes nodos de una manera eficiente. Posteriormente, se evalúan las prestaciones del algoritmo completo, considerando tanto el esquema dinámico de RA como el criterio de selección de nodo, en dos escenarios con distinta distribución de demanda de tráfico.

5.4.1 Condiciones de evaluación

Para este capítulo se continúan empleando condiciones de evaluación muy similares a las consideradas en los capítulos previos, y explicadas en detalle en el apartado 3.4, con algunas diferencias relacionadas principalmente con el modelo de generación de conexiones. Se han empleado los parámetros recogidos en la Tabla 4.1, que han sido seleccionados de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32], considerando la estructura de trama FDD. Se sigue considerando un sistema celular compuesto de 21 macroceldas trisectorizadas, sobre el que se despliegan dos relays en cada sector (Figura 4.7(a)), y siendo $d = 2/3 \cdot R$ y $\theta_0 = 30^\circ$. De la misma forma que en el capítulo anterior, en cada celda se definen tres zonas con la misma área, siendo la zona 0 la más cercana al DeNB, mientras que la zona 2 es la más exterior y alejada.

Se considera un ancho de banda de 5 MHz para todo el sistema, por lo que se dispone de 27 RBs, y cada uno de los 9 GrRBs contiene 3 RBs. Dentro de un mismo RB se asigna la misma potencia de transmisión y el mismo MCS a todas sus subportadoras. Se aplica el mismo modelado de nivel físico y de enlace descrito en el subapartado 3.4.1, modelando de forma explícita la interferencia. Se consideran los mismos MCSs, por lo que en la Tabla 3.1 pueden verse los valores de SINR requeridos, así como la tasa de datos útiles por RB para cada MCS. También se considera el mismo modelado del canal radio detallado en el subapartado 3.4.2, y en la Tabla 4.1 se recogen los valores relacionados con este modelado.

El mecanismo de CQI aplicado en este capítulo es el mismo que el considerado en el capítulo anterior, modelándose explícitamente tanto los errores en la estimación del canal, como los errores en la estimación de la interferencia. Los parámetros del esquema de CQI están recopilados en la Tabla 4.2. Sin pérdida de generalidad se asume como en los capítulos anteriores que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos entre el DeNB o el RN y el UE en el enlace descendente, aplicándose el mismo modelado de conexiones que en los capítulos previos (subapartado 3.4.4). Con el objetivo de evaluar las prestaciones que ofrece el algoritmo de reparto dinámico de recursos y criterio de selección de nodo ante condiciones heterogéneas de carga, en este capítulo se ha considerado un tráfico con restricciones de retardo, como es el modelo de tráfico ON-OFF, explicado en detalle en el subapartado 3.4.4.

Los esquemas de ICIC empleados en este capítulo no consideran una subbanda exterior de recursos de forma explícita para los DeNBs, por lo que la potencia máxima de transmisión ($P_{T,max}^n$) se distribuye de forma equitativa entre todos los RBs asignables, tanto en los DeNBs como en los RNs. El único nivel de la máscara de potencia ($M_{med,n}$) se obtiene de la misma forma que en los capítulos anteriores (ecuación (4.3)), y en la Tabla 5.10 se recogen los valores de las máscaras de potencia expresadas en dBm/RB. De la misma forma que en el capítulo anterior, se considera una asignación fija de potencia tanto en los DeNBs, como en los RNs. Por lo tanto, cuando un RB es asignado a un UE o a un RN, el DeNB o RN que da servicio asignará la potencia definida por la máscara de potencia para ese RB en concreto (M_{med}).

Aplicando el mismo planteamiento que en los capítulos anteriores, y al margen de la especificación LTE, como el número de RBs preasignados a los RNs es menor que el número de RBs disponibles en el sistema, se ha presupuestado un nivel de potencia en las señales de referencia incrementado respecto a la EPRE, y asimismo un nivel de transmisión por RB más alto, asumiendo que la potencia total ($P_{T,max}^n$) se va a repartir equitativamente entre

solo un subconjunto de los REs del ancho de banda total del sistema. Por otro lado, como el número de RBs planificados para los DeNBs excede el número de RBs disponibles en el sistema debido a la consideración de esquemas de reuso frecuencial, se ha presupuestado un nivel de potencia en las señales de referencia reducido respecto a la EPRE, y asimismo un nivel de transmisión por RB más bajo, asumiendo que la potencia total se va a repartir equitativamente entre un mayor conjunto de REs efectivos. Hay que tener en cuenta, que respecto al número total de RBs asignables por los DeNBs, la Tabla 5.10 incluye ambos tipos de subtrama ($N_{total,c}^{acceso}$ y $N_{total,c}^{backhaul}$), de tal forma que el nivel de potencia en las señales de referencia y la máscara de potencia se calculan para el tipo de subtrama más restrictivo.

$N_{total,c}^{acceso}$	$N_{total,c}^{backhaul}$	$N_{total,acceso,r}$	$M_{med,c}$	$M_{med,r}$
27	54	9	25.68	27.46

Tabla 5.10: Máscaras de potencia DeNBs y RNs [dBm/RB]

De la misma forma que en el capítulo anterior, las entidades asociadas con la gestión de recursos radio, incluyendo la asignación de potencia, la asignación de recursos en tiempo y frecuencia y la selección adaptativa del MCS, están localizadas en los DeNBs y los RNs. Las decisiones de scheduling se toman de forma independiente en cada nodo cada TTI, asumiéndose un periodo de scheduling de 1 ms. Además, como se ha comentado en los capítulos anteriores, en esta tesis la asignación de recursos se trata como un problema multidimensional. El esquema de ICIC determina qué recursos frecuenciales pueden ser asignados en cada nodo, sector y tipo de enlace. Posteriormente, es el scheduler el que asigna los recursos frecuenciales a cada UE o RN, aplicándose sus dos componentes de forma secuencial. A diferencia del capítulo anterior, se está usando el modelo de tráfico ON-OFF, que está limitado por el retardo, por lo que la política de scheduling temporal empleada en este capítulo es la misma que la presentada en el subapartado 3.4.6, y está basada en el retardo acumulado de los paquetes almacenados en los buffers de las conexiones de los usuarios. La política de scheduling temporal se expresa de nuevo en la ecuación (5.53), donde D_{max}'' es la cota máxima de retardo para el servicio cursado por el usuario y d_{HOL}'' es el retardo acumulado del TU que se encuentra en la cabecera de los buffers de la conexión del usuario. Merece la pena recordar que un TU es la cantidad mínima de datos que puede transmitir el sistema cuando un usuario recibe una asignación de recursos. Es decir, el tamaño del TU se determina como la cantidad de bits que se transmiten en un único RB cuando se emplea el MCS más bajo del sistema.

$$u^* = \arg \max_u \left(\frac{d_{HOL}^u}{D_{max}^u} \right) \quad (5.53)$$

Respecto al scheduling frecuencial de los DeNBs, el algoritmo considerado es muy similar al empleado en el capítulo anterior. Y es que, en primer lugar, el scheduler intenta asignar a los UEs RBs pertenecientes a la subbanda preasignada al sector que les da servicio, escogiendo para cada UE el RB en el que observa mejores condiciones de canal. Si toda la subbanda preasignada al sector que da servicio al UE ya ha sido asignada, el scheduler intenta asignar al UE RBs de la subbanda preasignada al sector con menor ocupación, escogiendo también el RB que ofrece al UE las mejores condiciones de canal. Si la asignación del UE no es posible, se inicia el proceso de renegociación, que permite reubicar a otros UEs ya asignados en otros RBs, con el objetivo de liberar RBs que puedan ser asignados al UE que se está considerando. Merece la pena destacar que después de realizar una asignación de RBs se vuelven a calcular los índices de prioridad temporal de todos los usuarios, se reordenan los usuarios con la nueva prioridad actualizada y se escoge al usuario más prioritario para la siguiente asignación. Por lo tanto, un usuario puede recibir varias asignaciones en un mismo TTI. En el caso de los RNs, el procedimiento seguido por el scheduler frecuencial es similar al de los DeNBs, con la única diferencia de que no hay una planificación de recursos frecuenciales prioritarios por sectores. El scheduler frecuencial seleccionará el MCS más alto posible, siempre que se satisfagan los requisitos de SINR ($SINR_{req}^m$).

Los usuarios se desplazan a una velocidad de 3km/h siguiendo el mismo patrón de movimiento que el aplicado en los capítulos anteriores (subapartado 3.4.8). Asimismo, el movimiento de los UEs está restringido para que siempre se mantengan dentro de los límites de su respectivo sector para evitar handovers entre sectores y entre DeNBs vecinos. De acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32] se considera que se ha llevado a cabo una planificación de las ubicaciones de los RNs, encontrando una ubicación óptima para cada RN que ofrece una optimización de las condiciones de canal observadas por el RN en el enlace con su DeNB. Esta optimización se traduce en las simulaciones añadiendo un bonus de 5 dB a las pérdidas de propagación del link entre el RN y su DeNB (DeNB→RN).

5.4.1.1 Generación de condiciones de carga heterogénea

Para llevar a cabo las simulaciones de este capítulo se ha considerado una distribución heterogénea de demanda de tráfico. Para ello, los usuarios generan conexiones de duración aleatoria (se obtiene aleatoriamente el número de subtramas que un usuario va a mantener su conexión activa), y cuando un nuevo

usuario necesita establecer una conexión, se escoge de forma aleatoria el modelo de tráfico que va a cursar ese usuario, de entre los dos modelos disponibles, cuyos parámetros se recogen en la Tabla 5.11.

Parámetro	Modelo de tráfico 1	Modelo de tráfico 2
T_{ON}	30 ms	60 ms
T_{OFF}	90 ms	60 ms
α	1/4	1/2
L	240 bits	360 bits
D_{max}^u	50 ms	50 ms

Tabla 5.11: Parámetros de los dos modelos de tráfico

Para calcular la tasa de datos requerida por cada usuario se tienen en cuenta los parámetros de su modelo de tráfico. El factor de actividad (α_m) para el modelo de tráfico m se calcula como se indica en la ecuación (5.54). Para cada usuario u se obtiene la tasa media requerida (T_{med}^u) según la ecuación (5.55), en la que se considera el factor de actividad y la tasa de pico (T_p^m) para su modelo de tráfico m . En el esquema de ICIC-RA dinámico, y en el criterio de selección de nodo, las estimaciones de la demanda de RBs de los UEs se realizan para el conjunto de subtrama de acceso y subtrama backhaul. Es decir, se estima la cantidad de RBs que demanda un UE cada dos subtramas. Por lo tanto, a la hora de calcular la tasa media requerida por cada UE se está considerando la tasa de datos promedio que un UE necesita transmitir cada dos subtramas. Por ello la tasa de pico se obtiene multiplicando por dos el tamaño de los paquetes de datos que se generan cada TTI durante el periodo ON.

$$\alpha_m = \frac{T_{ON}^m}{T_{ON}^m + T_{OFF}^m} \quad (5.54)$$

$$T_{med}^u = \alpha_m \cdot T_p^m = \alpha_m \cdot \frac{2 \cdot L_m}{1 \text{ TTI}} \quad (5.55)$$

Si se comparan ambos modelos de tráfico, la tasa media requerida por el modelo 2 es tres veces superior a la tasa media requerida por el modelo 1. Esta diferencia en la tasa media requerida, junto con la elección aleatoria del modelo de tráfico cuando un nuevo usuario necesita establecer una conexión, y junto con la duración aleatoria de las conexiones, permiten generar condiciones de carga heterogéneas entre los nodos y, además, condiciones de carga cambiantes a lo largo de las simulaciones. Para considerar el efecto de multiplexar varios

usuarios con un modelo de tráfico ON-OFF, en lugar de emplear directamente la tasa media requerida (T_{med}^u) de acuerdo a la ecuación (5.55), se aplica la aproximación Gaussiana [64] para calcular la tasa requerida equivalente ($C_{eq,gauss}^m$), tal y como se muestra en la ecuación (5.56), para todos los UEs que cursan el mismo modelo de tráfico.

$$T_{req}^u = C_{eq,gauss}^m$$

donde

$$C_{eq,gauss}^m = \frac{T_p^m \cdot (|U_c^m| \cdot \alpha_m + \sigma_m \cdot K)}{|U_c^m|} \quad (5.56)$$

con

$$\sigma_m = \sqrt{|U_c^m| \cdot \alpha_m \cdot (1 - \alpha_m)}$$

$$K = \sqrt{-\ln(2 \cdot \pi) - 2 \cdot \ln(\varepsilon_{gauss})}$$

U_c^m representa el conjunto de UEs conectados a la celda que cursan el modelo de tráfico m , y ε_{gauss} es la probabilidad de pérdida de paquetes. Esta aproximación se basa en que cuando el número de fuentes de tráfico ($|U_c^m|$) es suficientemente grande y el factor de actividad de dichas fuentes (α_m) es suficientemente pequeño, el tráfico agregado de las fuentes se aproxima a una Gaussiana. Asumiendo que se producen pérdidas de paquetes cada vez que se supera la capacidad disponible, se deriva la capacidad equivalente de las fuentes de tráfico ($C_{eq,gauss}^m$). Esta aproximación ignora la existencia y ocupación de un buffer, por lo que se obtiene una estimación de la tasa requerida de los usuarios (T_{req}^u) bastante conservadora.

5.4.2 Evaluación de prestaciones del esquema dinámico de RA-ICIC

La evaluación de las prestaciones del esquema dinámico de RA-ICIC y del criterio de selección de nodo propuestos se presenta principalmente en términos del porcentaje de descarte de TUs. La capacidad global del sistema se ha evaluado en términos del número de usuarios que puede servir el sistema satisfaciendo una cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) del 1%. Por tanto, se considera que se están satisfaciendo los requisitos de QoS de los usuarios, si el porcentaje de descarte promedio es inferior al 1%. Las simulaciones no consideran dinamismo de tráfico a nivel de conexión (establecimiento y liberación de nuevas conexiones), de tal forma que las conexiones están siempre activas, y se trata de explorar los límites de la región de scheduling. Si se aplicase un procedimiento de control de admisión, se reduciría el número máximo de conexiones activas en el sistema, debido a que los límites de la

región de scheduling solo se pueden alcanzar si se admite una elevada probabilidad de bloqueo de conexiones en el sistema.

En este subapartado se analizan las prestaciones del esquema dinámico de RA-ICIC bajo condiciones de demanda de tráfico heterogéneas. El objetivo es analizar si el esquema dinámico de RA es capaz de asignar los recursos frecuenciales a los enlaces directos y enlaces backhaul de forma eficiente, a la vez que se garantizan condiciones de transmisión apropiadas para ambos tipos de enlace, y se proporcionan prestaciones adecuadas a los UEs. Los UEs se distribuyen de forma uniforme a lo largo del área de cobertura de las celdas. No obstante, con el objetivo de forzar los límites de operación del esquema dinámico de RA-ICIC, en este subapartado se escogen aleatoriamente diferentes probabilidades para los dos modelos de tráfico disponibles (Tabla 5.11) en cada uno de los nodos. De esta forma, la probabilidad de que un nuevo usuario seleccione el modelo de tráfico 1 o el modelo de tráfico 2 es diferente en cada nodo, incrementando la heterogeneidad de la distribución de la demanda de tráfico. El esquema dinámico de RA-ICIC se compara con un escenario con condiciones de carga homogéneas, en el que se aplica un esquema de RA-ICIC estático. Para generar condiciones de carga homogéneas, los UEs se distribuyen de forma uniforme a lo largo del área de cobertura de las celdas, y todos los UEs del sistema emplean el mismo modelo de tráfico ON-OFF. Los parámetros de este modelo de tráfico ON-OFF se obtienen para que la tasa media requerida de los UEs (T_{med}^u) sea el promedio de las tasas medias requeridas de los dos modelos de tráfico disponibles en el escenario con demanda de tráfico heterogénea (Tabla 5.11). Respecto al esquema de RA-ICIC, en las subtramas de acceso se aplica el esquema representado en la Figura 5.4 (estático en ambos casos), y en las subtramas backhaul se aplica el esquema representado en la Figura 5.5, asignándose al enlace backhaul de cada RN su grupo primario y su grupo secundario, y sin llevar a cabo la adaptación de RBs. En ambos casos se utiliza un criterio de selección de nodo basado en la SINR, de tal forma que los UEs se conectan al nodo del que reciben el mayor nivel de SINR.

En la Figura 5.7 se representa la función de densidad de probabilidad (PDF) del número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada enlace backhaul ($NRB_{est,backhaul,r}$). Se representa la PDF para tres situaciones diferentes, en las que el número medio de UEs en cada celda (\overline{NUE}) es igual a 90, 99 y 108 respectivamente. Puede verse que la PDF es bastante similar para las tres situaciones, y que efectivamente se está consiguiendo que la demanda de tráfico de los RNs sea heterogénea. Por lo tanto, el esquema dinámico de RA-ICIC tiene que enfrentarse al reto de asignar diferentes cantidades de RBs a cada uno de los RNs de la celda, pero siempre satisfaciendo las restricciones de ICIC para garantizar condiciones de transmisión apropiadas para los enlaces backhaul.

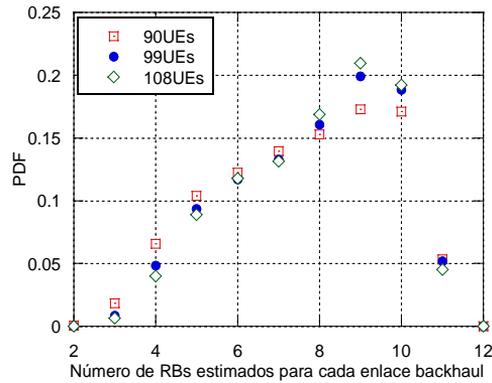
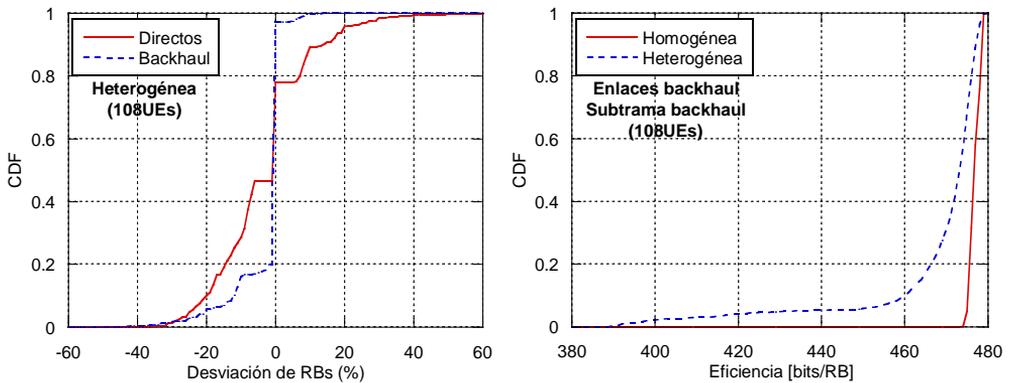


Figura 5.7: PDF del número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada enlace backhaul, para $\overline{NUE} = 90, 99$ y 108

En la Figura 5.8(a) se representa la CDF del porcentaje de desviación, calculado de acuerdo a la ecuación (5.57), entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada sector para sus enlaces directos ($NRB_{est,directos,s}$), o cada RN para su enlace backhaul ($NRB_{est,backhaul,r}$), y el número de RBs que el esquema dinámico de RA-ICIC ha sido capaz de asignar a cada nodo n ($NRB_{asig,n}$) satisfaciendo las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7). Los resultados se representan para el caso concreto de $\overline{NUE} = 108$. Los valores negativos indican que el esquema dinámico de RA no ha sido capaz de satisfacer los RBs estimados para el nodo, mientras que los valores positivos indican que el esquema dinámico de RA ha asignado al nodo más RBs que los que se habían estimado ($NRB_{est,n}$). Con respecto a los enlaces backhaul, puede verse que en el 80% de los casos el esquema dinámico de RA satisface los RBs que se ha estimado que debería recibir el enlace backhaul. Y para aquellos casos en los que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer los RBs estimados, la desviación es inferior al 20% en la mayor parte de ellos. Los casos en los que se obtiene una desviación positiva se deben a la asignación de RBs inicialmente planificados para los enlaces directos del sector adyacente del RN, ya que como se tiene en cuenta la degradación de prestaciones en esos RBs, un RN puede llegar a recibir un mayor número de RBs que los que se han estimado que debería recibir. Por ejemplo, si a un determinado enlace backhaul le falta por recibir un RB, y el esquema dinámico de RA ya solo es capaz de asignarle RBs planificados para los enlaces directos de su sector adyacente, el algoritmo puede asignar al RN dos RBs, ya que como las prestaciones van a ser menores en esos RBs, un único RB no es suficiente para alcanzar los RBs que se ha estimado que debería recibir ese enlace backhaul. Respecto a los enlaces directos, en los casos en los que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer los RBs estimados, la desviación es inferior al 25% en la mayor parte de ellos. Por lo tanto, el esquema dinámico de RA-ICIC es capaz de asignar los recursos

frecuenciales a los enlaces directos y enlaces backhaul de forma eficiente, satisfaciendo la distribución de recursos deseada para los enlaces backhaul en el 80% de los casos, y obteniendo desviaciones menores al 25% en la mayoría de los casos en los que no es capaz de satisfacer la distribución deseada para enlaces backhaul y para enlaces directos. Como el esquema dinámico de RA siempre intenta maximizar los RBs que quedan disponibles para los enlaces directos, en el 22% de los casos la desviación es positiva.

$$desviación(\%) = \left[\frac{(NRB_{asig,n} - NRB_{est,n})}{NRB_{est,n}} \right] \cdot 100 \quad (5.57)$$



a) CDF del porcentaje de desviación entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo y el número de RBs que el algoritmo de RA realmente asigna a cada nodo **b) CDF de la eficiencia por RB (bits/RB) lograda por los enlaces backhaul para ambos escenarios**

Figura 5.8: Resultados del esquema dinámico de RA-ICIC ($\overline{NUE} = 108$)

En la Figura 5.8(b) se compara la CDF de la eficiencia por RB de los enlaces backhaul, representada en términos de la cantidad promedio de bits de información que pueden ser transmitidos en un RB, entre el escenario con demanda de tráfico heterogénea, y el escenario con demanda de tráfico homogénea y sin adaptación de la distribución de recursos. En el escenario con demanda de tráfico homogénea, como siempre se garantiza que, si un RB es asignado a un enlace backhaul, este RB solo puede ser reutilizado por su sector opuesto del DeNB, la eficiencia se mantiene muy estable. Por otro lado, cuando se aplica el esquema dinámico de RA-ICIC, el enlace backhaul de un RN puede recibir RBs que son reutilizados por su sector adyacente, obteniéndose una eficiencia por RB más baja en estos casos, debido al incremento en la interferencia. No obstante, puede verse que en el 80% de los casos la desviación entre el escenario con demanda heterogénea y el escenario con demanda homogénea es despreciable (466 bits vs. 476 bits), ya que el algoritmo dinámico de RA solo asigna a los enlaces backhaul recursos que son reutilizados por su

sector adyacente bajo ciertas restricciones, y con el objetivo de tratar de alcanzar la distribución de recursos más parecida posible a la distribución deseada.

En la Figura 5.9 se muestra la CDF del porcentaje de descarte de TUs de los mUEs para ambos escenarios ($\overline{NUE} = 108$). Hay que tener en cuenta que el escenario en el que se aplica el esquema dinámico de RA-ICIC tiene que hacer frente a una distribución heterogénea de la demanda de tráfico, pero a pesar de ello, las prestaciones de los mUEs solo se degradan ligeramente, comparadas con el escenario de demanda de tráfico homogénea. Por lo tanto, el esquema dinámico de RA-ICIC es capaz de asignar los recursos frecuenciales a los enlaces directos y enlaces backhaul de forma dinámica, sin degradar significativamente las prestaciones de los mUEs.

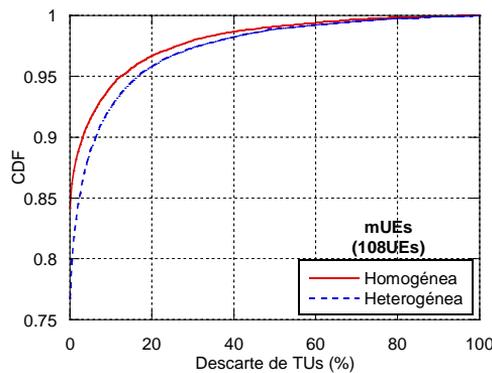


Figura 5.9: CDF del porcentaje de TUs descartados para los mUEs en ambos escenarios ($\overline{NUE} = 108$)

Analizando en más detalle la calidad de las transmisiones de los enlaces directos cuando se aplica el esquema dinámico de RA, en la Figura 5.10(a) y la Figura 5.10(b) se representa la eficiencia por RB (promedio de bits de información por RB) alcanzada por los enlaces directos en ambos escenarios, y para las subtramas backhaul y subtramas de acceso respectivamente. Con respecto a las subtramas backhaul (Figura 5.10(a)), la eficiencia por RB alcanzada por los enlaces directos es más baja en el escenario con demanda de tráfico heterogénea. En ambos escenarios, los RBs planificados para los enlaces directos pueden ser reutilizados por otro sector del DeNB para asignar sus enlaces backhaul, introduciendo interferencia intra-celular. No obstante, el scheduler es capaz de asignar estos RBs a mUEs que satisfagan los requisitos de SINR, generalmente seleccionando a aquellos mUEs que son menos interferidos por las transmisiones backhaul que interfieren cada RB en concreto. Sin embargo, cuando se aplica el esquema dinámico de RA, los sectores interferentes de los DeNBs adyacentes pueden asignar sus enlaces backhaul en cualquier RB, por lo que los niveles de interferencia sufridos por los mUEs son superiores en ciertas situaciones, degradándose la eficiencia alcanzada por los

enlaces directos. Por otro lado, en el escenario con demanda de tráfico homogénea todos los RBs planificados para los enlaces directos están también planificados para el enlace backhaul de un RN de la celda (Figura 5.5). Sin embargo, cuando se aplica el esquema dinámico de RA, las asignaciones de RBs tienen que satisfacer las restricciones de ICIC (Tabla 5.6 y Tabla 5.7), por lo que se dan situaciones en las que un RB planificado para los enlaces directos de un sector, no es planificado para el enlace backhaul de un RN, y por lo tanto, no es reutilizado dentro del DeNB. En estos RBs los mUEs observan mejores condiciones de interferencia, obteniéndose mejores eficiencias, tal y como se ve en la Figura 5.10(a).

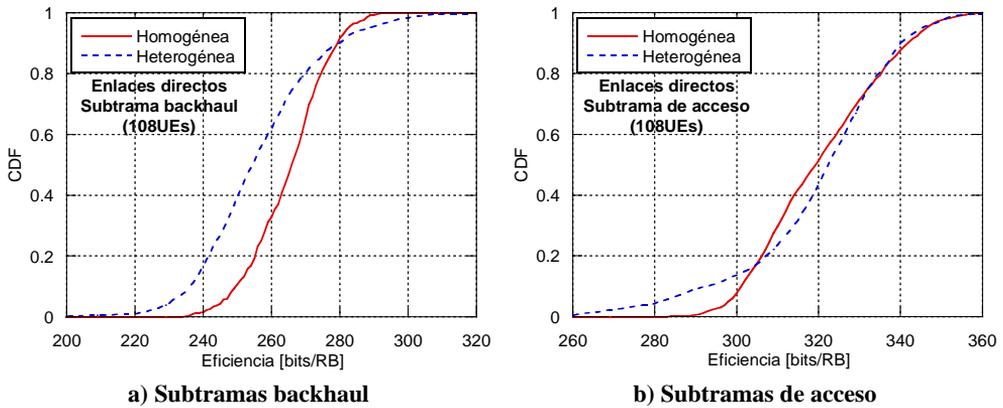


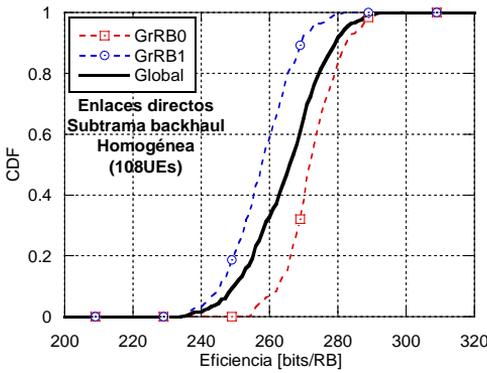
Figura 5.10: CDF de la eficiencia por RB (bits/RB) lograda por los enlaces directos para ambos escenarios ($\overline{NUE} = 108$)

Con respecto a las subtramas de acceso (Figura 5.10(b)), el esquema de ICIC aplicado en ambos escenarios es el mismo (Figura 5.4), y por lo tanto, las condiciones de interferencia que sufren los mUEs son similares en ambos escenarios. Si se comparan las condiciones de interferencia que observan los mUEs en ambos tipos de subtrama, en los dos escenarios los mUEs sufren mayores niveles de interferencia en las subtramas backhaul que en las subtramas de acceso, debido al mayor reuso frecuencial que se aplica en las subtramas backhaul para asignar los enlaces backhaul de los RNs. Por ello las eficiencias obtenidas son mejores en las subtramas de acceso. No obstante, el scheduler puede asignar en las subtramas backhaul a aquellos mUEs que observan mejores condiciones de canal, para así compensar los mayores niveles de interferencia. Por otro lado, el scheduler puede asignar a los mUEs con peores condiciones de canal en las subtramas de acceso. En el escenario en el que se aplica el esquema dinámico de RA, la distribución de la demanda de tráfico es heterogénea y, por lo tanto, el algoritmo de RA adaptará los RBs planificados para los enlaces directos de cada sector en las subtramas backhaul. Además, las condiciones de interferencia observadas por los mUEs en las subtramas backhaul son peores en

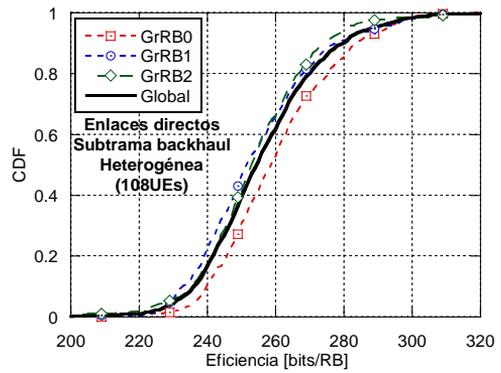
el escenario con demanda de tráfico heterogénea. Todo ello conlleva que la distribución de los mUEs que son asignados en cada tipo de subtrama sea diferente en ambos escenarios, obteniéndose una CDF de la eficiencia por RB diferente para las subtramas de acceso, a pesar de que el esquema de ICIC aplicado en estas subtramas es el mismo en ambos escenarios.

Finalmente, en la Figura 5.11(a), Figura 5.11(b), Figura 5.11(c) y Figura 5.11(d) se representa la CDF de la eficiencia por RB alcanzada por los enlaces directos, para ambos escenarios y para ambos tipos de subtrama, pero separando los resultados por GrRBs. Si se analizan las condiciones de interferencia observadas por los mUEs, se pueden ordenar los GrRBs disponibles para los enlaces directos, de mejores a peores condiciones, para cada sector y para cada tipo de subtrama. De tal forma que el GrRB0 es el que mejores condiciones de interferencia observa, mientras que el GrRB2 es el que peores condiciones de interferencia proporciona. Por ejemplo, si se toma como referencia el sector A de la celda 1 para las subtramas de acceso (Figura 5.4), el grupo A2 es el GrRB0, el grupo A3 es el GrRB1 y finalmente el grupo A1 es el GrRB2. El scheduler frecuencial asigna a los UEs los RBs donde observan mejores condiciones de canal, por lo que los RBs pertenecientes al GrRB0 son los que más veces se asignan, y además tienden a ser asignados en primer lugar.

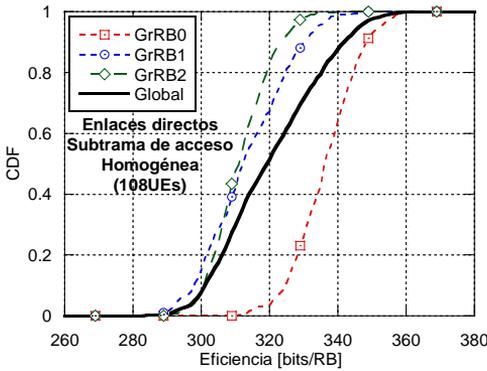
Si en primer lugar se analizan las subtramas backhaul para el escenario con demanda de tráfico homogénea (Figura 5.11(a)), cada sector tiene planificados dos GrRBs para asignar a sus enlaces directos. La distribución de la interferencia a lo largo del área de cobertura del sector es diferente para ambos GrRBs, por lo que en este caso es complicado comparar las condiciones de interferencia observadas en los dos grupos. No obstante, en una región del área de cobertura del sector, uno de los dos GrRBs proporciona condiciones notablemente mejores, y los RBs pertenecientes a este grupo son asignados más veces, por lo que se escoge como GrRB0. Además, los RBs del GrRB0 son asignados con mayor frecuencia a los UEs del interior del DeNB, que en el caso de los RBs del GrRB1. Por lo tanto, como los UEs del interior observan mejores condiciones de canal al estar ubicados más cerca del DeNB, la eficiencia lograda en los RBs del GrRB0 es mejor que la eficiencia lograda en los RBs del GrRB1. Por otro lado, en el escenario con demanda de tráfico heterogénea (Figura 5.11(b)), las eficiencias obtenidas para los tres GrRBs que pueden ser planificados para los enlaces directos de cada sector son bastante similares. Al aplicar el esquema dinámico de RA-ICIC, la distribución de recursos de los DeNBs se va ajustando a los cambios en la demanda de tráfico y, por lo tanto, las condiciones de interferencia de los diferentes GrRBs pueden cambiar con estos ajustes de la distribución de recursos. Ello conlleva que no se pueda definir qué GrRB proporciona las mejores condiciones de interferencia, obteniéndose condiciones similares para todos ellos.



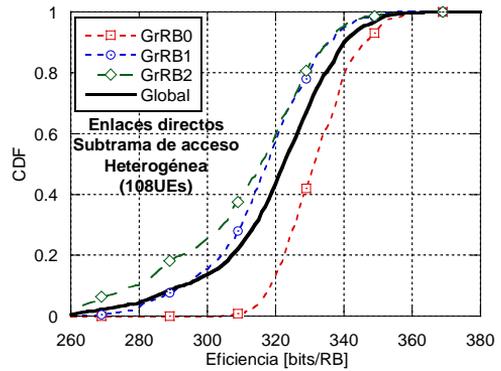
a) Subtramas backhaul, para el escenario con demanda de tráfico homogénea



b) Subtramas backhaul, para el escenario con demanda de tráfico heterogénea



c) Subtramas de acceso, para el escenario con demanda de tráfico homogénea



d) Subtramas de acceso, para el escenario con demanda de tráfico heterogénea

Figura 5.11: CDF de la eficiencia por RB (bits/RB) lograda por los enlaces directos para ambos escenarios, separando los resultados por GrRBs ($NUE = 108$)

Respecto a las subtramas de acceso (Figura 5.11(c) y Figura 5.11(d)), las condiciones de interferencia observadas en los RBs pertenecientes al GrRB2 son significativamente peores, que las observadas en los RBs del GrRB0 y del GrRB1. Por otro lado, las condiciones de interferencia de los RBs del GrRB0 son solo ligeramente mejores que las proporcionadas por los RBs del GrRB1. No obstante, los RBs pertenecientes al GrRB0 son los que se asignan más veces, y como además son asignados con mayor frecuencia a los UEs del interior del DeNB que en el caso de los RBs del GrRB1, se obtiene una eficiencia por RB superior. En cuanto a los RBs pertenecientes al GrRB2, estos RBs no siempre pueden ser asignados a los usuarios del exterior del DeNB, debido a los elevados niveles de interferencia, por lo que los RBs de este grupo son asignados con bastante más frecuencia a los usuarios del interior del DeNB que en el caso de los otros dos GrRBs. Debido a esto, la eficiencia alcanzada en los RBs del GrRB2 es solo un poco más baja que la eficiencia alcanzada en el GrRB1.

5.4.2.1 Conclusiones

Los resultados que se han analizado muestran que el esquema dinámico de RA-ICIC propuesto es capaz de repartir los recursos entre los enlaces directos y los enlaces backhaul de forma eficiente, bajo condiciones de demanda de tráfico heterogéneas, satisfaciendo la distribución de recursos deseada para los enlaces backhaul en el 80% de los casos, y obteniendo desviaciones menores al 25% en la mayoría de los casos en los que no es capaz de satisfacer la distribución deseada para enlaces backhaul y para enlaces directos. En el caso de los enlaces directos, se cuenta además con cierta flexibilidad en sus asignaciones, que permite compensar aquellas situaciones en las que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer la distribución deseada. Por un lado, una vez que el scheduler del DeNB ha asignado todos los paquetes de datos dirigidos a sus RNs, si han quedado sin asignar RBs inicialmente reservados para los enlaces backhaul, estos RBs pueden ser asignados a los enlaces directos. Y además, por otro lado, aunque se definen GrRBs prioritarios para los enlaces directos de cada sector, se aplica la ordenación representada en la Figura 5.4, de tal forma que un sector puede asignar a sus mUEs RBs planificados para los enlaces directos de otro sector si es necesario. Finalmente, también es importante destacar que el esquema dinámico es capaz de distribuir los recursos frecuenciales para satisfacer la distribución deseada, sin degradar excesivamente la calidad de las transmisiones de los enlaces directos y de los enlaces backhaul. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que el esquema dinámico de RA tiene que hacer frente a condiciones heterogéneas de demanda de tráfico, por lo que es asumible una cierta degradación de la calidad de las transmisiones debida a la adaptación dinámica del esquema de ICIC, frente a un escenario con condiciones homogéneas de demanda de tráfico.

5.4.3 Evaluación de prestaciones del criterio de selección de nodo

Para evaluar si el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM) es capaz de mejorar las prestaciones del sistema, los resultados obtenidos por el criterio LBCSM se comparan con los resultados obtenidos por dos criterios diferentes, en los que los usuarios se conectan al nodo del que reciben un mayor nivel de RSRP y un mayor nivel de SINR respectivamente. Por lo tanto, en ambos casos no se aplica el criterio de selección de nodo propuesto en este capítulo, y en los resultados se referencian como criterio RSRP y criterio SINR. Sin embargo, en los tres casos se aplica el esquema dinámico de RA-ICIC, de tal forma que la distribución de recursos frecuenciales se adapta dinámicamente a la demanda de tráfico de cada nodo para los tres criterios de selección de nodo evaluados. Con el objetivo de comprobar que el esquema dinámico de RA-ICIC y el criterio de selección de nodo propuestos son capaces de gestionar de forma eficiente

situaciones con distribuciones de carga heterogéneas y nodos que tienen que servir una alta demanda de tráfico, se han evaluado sus prestaciones para dos escenarios diferentes que se presentan en los siguientes subapartados.

5.4.3.1 Escenario 1

El objetivo del escenario 1 es concentrar una gran cantidad de usuarios en los alrededores de los RNs, para evaluar si el esquema dinámico de RA y el criterio LBCSM son capaces de gestionar situaciones en las que las demandas de tráfico de los RNs pueden ser muy elevadas. Del número medio de UEs que se distribuyen en cada DeNB (\overline{NUE}), el 15% se distribuye de forma uniforme dentro de un círculo alrededor de cada RN. Por lo tanto, el 90% de \overline{NUE} se distribuye alrededor de los RNs, y el 10% restante se distribuye de forma uniforme a lo largo del área de cobertura del DeNB. En la Figura 5.12 se representa un ejemplo de la distribución de usuarios que se lleva a cabo en el escenario 1.

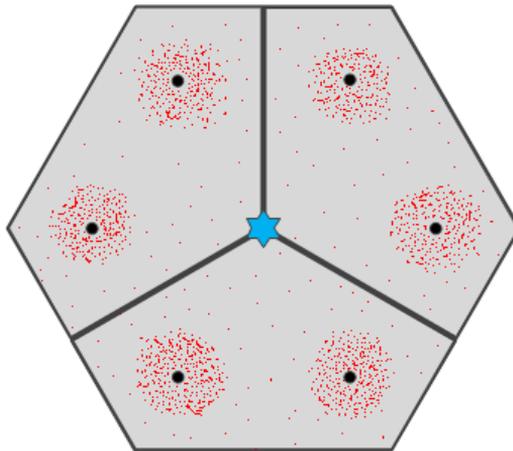


Figura 5.12: Ejemplo de distribución de usuarios para el escenario 1

En la Figura 5.13 se representa el porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, para los tres criterios de selección de nodo y variando el número medio de UEs desplegados por DeNB (\overline{NUE}). En este escenario, si el criterio de selección de nodo se basa únicamente en la RSRP o en la SINR, muchos usuarios seleccionan un RN para conectarse a la red. Esto conlleva que a medida que se incrementa el número de UEs desplegados por DeNB, el porcentaje de TUs descartados aumente rápidamente para los criterios RSRP y SINR, ya que los RNs están sobrecargados, y no son capaces de satisfacer los requisitos de QoS de todos sus rUEs, debido a la falta de recursos frecuenciales en los enlaces de acceso y en el enlace backhaul. Hay que tener en cuenta que, aunque el esquema dinámico de RA sea capaz de adaptar los recursos asignados a los

enlaces backhaul de los RNs, la distribución de recursos siempre tiene que satisfacer las restricciones de ICIC a nivel de celda y a nivel de sector (Tabla 5.8). Además, tal y como se ha visto en el capítulo anterior, el throughput alcanzable por los rUEs no siempre se puede incrementar aumentando los RBs planificados para los enlaces de acceso de los RNs, e incrementar la cantidad de RBs por encima de los 3GrRBs no aporta una ganancia de prestaciones significativa. Por lo tanto, la capacidad que se puede alcanzar en los enlaces de acceso y en los enlaces backhaul tiene unos límites, y para los criterios basados en RSRP y SINR se conectan demasiados UEs a los RNs, incrementándose rápidamente el porcentaje de descarte de TUs a medida que se aumenta el número de UEs. Las prestaciones que ofrecen ambos criterios son bastante similares, ya que en ambos casos la gran mayoría de UEs concentrados alrededor de los RNs se conectan a los RNs, debido a que el criterio de selección de nodo se basa exclusivamente en medidas de la RSRP y SINR respectivamente.

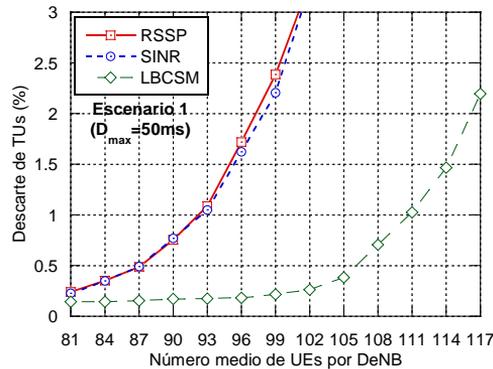


Figura 5.13: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1 ($D_{max}^u = 50ms$)

Sin embargo, cuando se aplica el criterio de selección de nodo propuesto se logra reducir de forma muy significativa el porcentaje de descarte de TUs, incrementando notablemente el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo la cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) del 1%. El criterio LBCSM es capaz de transferir parte de los UEs que se concentran en los alrededores de los RNs al DeNB, ya que, aunque reciben mejores niveles de RSRP y SINR de los RNs, son capaces de alcanzar mejores prestaciones conectándose al DeNB, aprovechando la mayor disponibilidad de recursos en los enlaces directos. De esta forma se consigue reducir la carga de tráfico de los RNs, evitando que se saturen los enlaces de acceso y enlaces backhaul, y se mejora la utilización de los recursos frecuenciales disponibles en el sistema. El criterio LBCSM logra una ganancia alrededor del 20% en el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS, considerando los 111 UEs que es capaz de servir para el criterio LBCSM, frente a los 93 UEs que es capaz de servir para los criterios RSRP y SINR.

En la Figura 5.14 se muestra la CDF del porcentaje de TUs descartados, separando los resultados entre mUEs y rUEs, para el caso en el que el número medio de UEs desplegados en cada DeNB (\overline{NUE}) es 90. Cuando se emplea el criterio LBCSM se mejoran muy significativamente las prestaciones de los rUEs, ya que se consigue reducir la carga de tráfico de los RNs, pudiéndose satisfacer los requisitos de QoS de los rUEs, y reduciéndose el porcentaje de descarte de TUs. Por otro lado, a pesar de que cuando se aplica el criterio LBCSM el número de UEs que se conectan directamente a los DeNBs es mayor, las prestaciones de los mUEs no solo no se degradan, sino que se mejoran. Hay que tener en cuenta que el algoritmo dinámico de RA-ICIC es capaz de incrementar los RBs planificados para los enlaces directos, para compensar el incremento en la demanda de tráfico. El criterio de selección de nodo propuesto, de entre todos los UEs que se encuentran en los alrededores de los RNs, selecciona a aquellos que observan las mejores condiciones de canal de su DeNB para ser transferidos al DeNB. Por ello, aunque muchos de estos UEs observan mayores niveles de SINR de los RNs, obtienen buenas prestaciones conectándose directamente al DeNB. Además, el esquema de ICIC propuesto para las subtramas de acceso planifica para los enlaces de acceso de los RNs recursos frecuenciales que no son potencialmente asignados por los enlaces directos de su sector. Por lo tanto, el scheduler es capaz de asignar a estos usuarios RBs que no son asignados por los enlaces de acceso de su RN más cercano. Finalmente, también hay que tener en cuenta que la mayor parte de los UEs que se encuentran en los alrededores de los RNs se encuentran ubicados en la zona 1 del DeNB y, por lo tanto, son UEs que no se encuentran en las zonas más exteriores de los DeNBs. Por lo tanto, gracias a que los UEs que son traspasados a los DeNBs son capaces de recibir altas tasas de datos de su DeNB, la ganancia que proporciona el criterio de selección de nodo es tan significativa para el escenario 1.

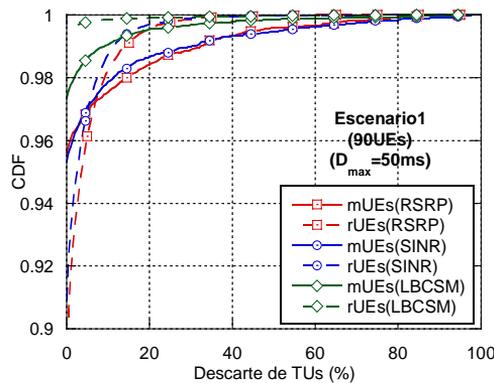


Figura 5.14: CDF del porcentaje de TUs descartados para el escenario 1 ($\overline{NUE} = 90$) ($D_{max}^u = 50ms$)

En la Figura 5.15 se representa la CDF del porcentaje de desviación, calculado de acuerdo a la ecuación (5.57), entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), y el número de RBs que el esquema dinámico de RA-ICIC ha sido capaz de asignar a cada nodo ($NRB_{asig,n}$) satisfaciendo las restricciones de ICIC. Los resultados se muestran para el caso concreto en el que el número medio de UEs desplegados en cada DeNB (\overline{NUE}) es 108, aplicándose el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM). Respecto a los enlaces backhaul, en más del 80% de los casos el esquema dinámico de RA satisface los RBs que se ha estimado que debería recibir el enlace backhaul. Y para aquellos casos en los que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer los RBs estimados, la desviación es inferior al 20%. En relación a los enlaces directos, en los casos en los que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer los RBs estimados, la desviación es inferior al 25%. Los resultados están en línea con los analizados en el subapartado 5.4.2, pero hay que tener en cuenta que la distribución de la demanda de tráfico empleada en este subapartado es diferente. No obstante, los resultados vuelven a mostrar que el esquema dinámico de RA-ICIC es capaz de asignar los recursos frecuenciales a los enlaces directos y enlaces backhaul de forma eficiente, bajo condiciones de demanda de tráfico heterogéneas.

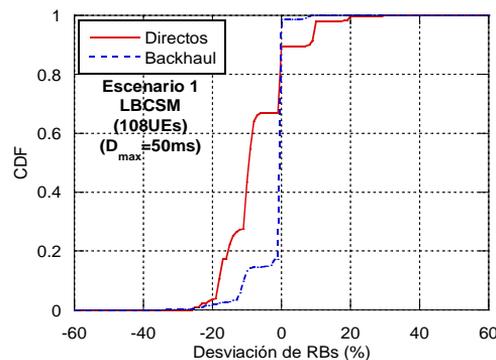


Figura 5.15: CDF del porcentaje de desviación entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo y el número de RBs que el algoritmo de RA realmente asigna a cada nodo para el escenario 1 ($\overline{NUE} = 108$) ($D_{max}^u = 50ms$)

En la Figura 5.16 se representa el porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, cuando se incrementa la cota máxima de retardo (D_{max}^u) a 150 ms. Si se compara con los resultados obtenidos cuando D_{max}^u es 50 ms (Figura 5.13), puede verse que el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo la cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) es mayor, ya que la cota de retardo es menos restrictiva, y por lo tanto, los paquetes de datos pueden acumular mayores retardos. Las conclusiones son similares en ambas situaciones, y el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM) es capaz de transferir parte de los UEs

que se concentran en los alrededores de los RNs al DeNB, aprovechando la mayor disponibilidad de recursos en los enlaces directos, e incrementando notablemente el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo $Cota_{desc}^{obj}$. Por lo tanto, gracias a que el criterio de selección de nodo propuesto, además de considerar el nivel de SINR recibido por los UEs de los diferentes nodos, también considera la distribución de la carga de tráfico, se consigue aprovechar mejor los recursos frecuenciales disponibles, mejorando significativamente las prestaciones del sistema. El criterio LBCSM logra una ganancia del 17% en el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS, considerando los 125 UEs que es capaz de servir para el criterio LBCSM, frente a los aproximadamente 107 UEs que es capaz de servir para los criterios RSRP y SINR.

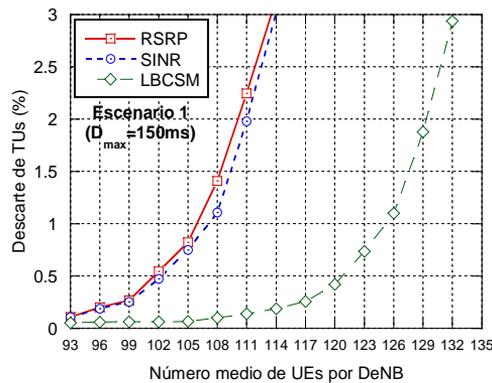


Figura 5.16: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, cuando la cota máxima de retardo (D_{max}^{μ}) se incrementa a 150ms

En la Figura 5.17 se representa el porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, pero modificando la distribución de los UEs, de tal forma que se mantiene fijo el número medio de UEs concentrados alrededor de cada RN (12 UEs alrededor de cada RN, que equivale al 15% de los UEs en el caso de $\overline{NUE} = 81$), y a medida que se incrementa el número medio de UEs distribuidos en cada DeNB (\overline{NUE}), se incrementa el número medio de UEs distribuidos de forma uniforme a lo largo del área de cobertura del DeNB. Hay que tener en cuenta que con esta distribución de UEs, aunque el número de UEs que potencialmente se conectan a los DeNBs aumenta más rápido que el número de UEs que potencialmente se conectan a los RNs a medida que se aumenta \overline{NUE} , el aumento de potenciales rUEs no es despreciable. El objetivo de este escenario 1 modificado es evaluar las prestaciones del criterio de selección de nodo propuesto, en un escenario en el que la demanda de tráfico de los RNs no es mucho más alta que la demanda de tráfico de los DeNBs. Cuando se aplican los criterios RSRP y SINR, el porcentaje de descarte de TUs aumenta tanto para

mUEs, como para rUEs, a medida que se aumenta \overline{NUE} . En el caso de los rUEs, aunque la capacidad del enlace backhaul está limitada por el reparto de los recursos disponibles con los enlaces directos, es más significativa la limitación en los recursos frecuenciales disponibles para los enlaces de acceso. Por ello, las peores prestaciones se obtienen cuando se emplea el criterio RSRP, ya que un mayor número de UEs se conectan a los RNs si se compara con el criterio SINR, saturando los enlaces de acceso principalmente.

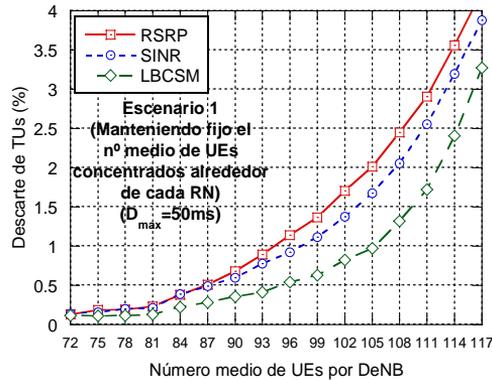


Figura 5.17: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 1, cuando se mantiene fijo el número medio de UEs concentrados alrededor de cada RN y se incrementa el número medio de UEs distribuidos uniformemente en el área de cobertura del DeNB ($D_{max}^u = 50ms$)

Cuando se emplea el criterio de selección de nodo propuesto, parte de los UEs que observan mejores condiciones de canal de los RNs son transferidos a los DeNBs, aliviando la saturación de los enlaces de acceso, y reduciendo la demanda de recursos de los enlaces backhaul. Esto facilita el reparto de recursos frecuenciales entre enlaces directos y enlaces backhaul, y permite mejorar las prestaciones del sistema, ya que los UEs que son transferidos a los DeNBs son capaces de obtener mayores tasas de datos, al contar con una mayor disponibilidad de recursos en los enlaces directos. Como el criterio de selección de nodo, incluyendo sus procesos de redistribución de UEs, transfiere a los DeNBs a aquellos UEs que también obtienen niveles de SINR aceptables de su DeNB, otros UEs que, aunque no estén ubicados cerca de los RNs reciben peores condiciones de canal del DeNB, pueden permanecer conectados a los RNs, gracias a que se distribuye la carga de tráfico entre los diferentes nodos del sistema. Aunque en este escenario 1 modificado, la mejora de prestaciones proporcionada por el criterio LBCSM no es tan alta como en el escenario 1 convencional, se obtiene una significativa ganancia del 8% en el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS. Por lo tanto, el criterio de selección de nodo propuesto también es capaz de mejorar notablemente las prestaciones de la red en situaciones en las que la demanda de

tráfico de los RNs no es mucho más alta que la demanda de tráfico de los DeNBs.

Los resultados analizados para el escenario 1 muestran que el criterio de selección de nodo propuesto es capaz de ofrecer mejoras muy significativas en las prestaciones del sistema para escenarios en los que las demandas de tráfico de los RNs son elevadas. Los criterios que se basan exclusivamente en medidas de la RSRP y de la SINR no tienen en cuenta la distribución de carga entre los diferentes nodos del sistema, y la mayor parte de los UEs se conectan a los RNs, saturando los enlaces de acceso y los enlaces backhaul, e incrementando el porcentaje de descarte de los TUs, ya que la red no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS de los rUEs. Sin embargo, el criterio de selección de nodo propuesto es capaz de transferir parte de los UEs que se encuentran en los alrededores de los RNs a los DeNBs, reduciendo la demanda de tráfico de los RNs, y mejorando las prestaciones del sistema. Además, como el criterio de selección de nodo escoge para ser transferidos a aquellos UEs que observan las mejores condiciones de canal respecto al DeNB, estos UEs son capaces de satisfacer sus requisitos de QoS, incrementándose la cantidad de UEs a los que el sistema es capaz de dar servicio satisfaciendo $Cota_{desc}^{obj}$.

5.4.3.2 Escenario 2

El objetivo del escenario 2 es concentrar una gran cantidad de usuarios en zonas en las que potencialmente se conecten a los DeNBs, pero que no estén muy alejados de los RNs, para evaluar si el esquema dinámico de RA y el criterio de selección de nodo propuestos son capaces de gestionar situaciones en las que las demandas de tráfico de los DeNBs pueden ser muy elevadas. Del número medio de UEs que se distribuyen en cada DeNB (\overline{NUE}), el 90% se concentra en las zonas que se sitúan entre los RNs y el DeNB, y el 10% restante se distribuye de forma uniforme a lo largo del área de cobertura del DeNB. En la Figura 5.18 se representa un ejemplo de la distribución de usuarios que se lleva a cabo en el escenario 2.

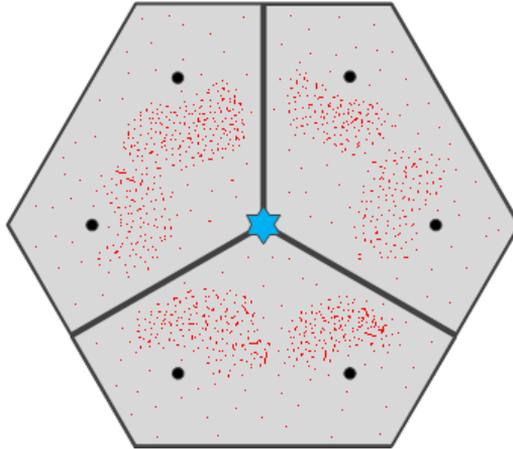


Figura 5.18: Ejemplo de distribución de usuarios para el escenario 2

En la Figura 5.19 se representa el porcentaje de TUs descartados para el escenario 2, para los tres criterios de selección de nodo y variando el número medio de UEs desplegados por DeNB (\overline{NUE}). Las peores prestaciones se obtienen cuando se emplea el criterio de selección basado exclusivamente en la SINR, ya que una gran cantidad de UEs se conectan a los DeNBs, y los sectores no disponen de suficientes RBs para satisfacer los requisitos de QoS de sus mUEs, incrementándose el porcentaje de descarte de TUs a medida que el número medio de UEs desplegados en los DeNBs (\overline{NUE}) aumenta. Cuando el criterio de selección de nodo se basa exclusivamente en la RSRP, una mayor cantidad de UEs se conectan a los RNs y, por lo tanto, los DeNBs no están tan sobrecargados como cuando se emplea el criterio SINR. Por esta razón el porcentaje de descarte de TUs es menor cuando se emplea el criterio RSRP que cuando se emplea el criterio SINR.

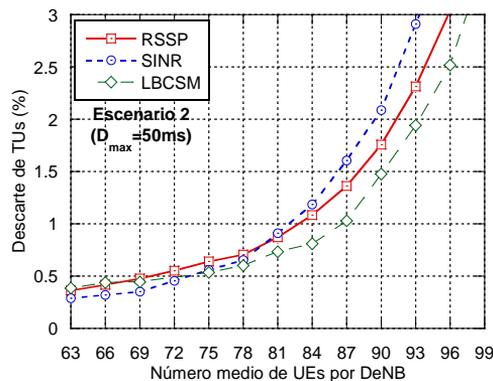


Figura 5.19: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 2 ($D_{max}^u = 50ms$)

Si se aplica el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM), el porcentaje de descarte de TUs se reduce, y se aumenta el número de UEs a los que puede dar servicio la red satisfaciendo la cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$). El criterio LBCSM es capaz de transferir parte de los UEs que reciben mayores niveles de SINR del DeNB a los RNs, reduciendo la saturación de los enlaces directos, y mejorando la utilización de los recursos frecuenciales al aprovechar la mayor disponibilidad de RBs en los enlaces backhaul y enlaces de acceso. Si se comparan los resultados obtenidos para el escenario 2 con los obtenidos para el escenario 1, puede verse que la mejora proporcionada por el criterio LBCSM es menor en el escenario 2, ya que el área de cobertura de los RNs es más reducida, y es más difícil encontrar UEs candidatos ($SINR_{TH}^{cand}$) a ser transferidos a los RNs. En el escenario 2, el criterio LBCSM logra una ganancia del 6% en el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS, considerando los 87 UEs que es capaz de servir para el criterio LBCSM, frente a los aproximadamente 82 UEs que es capaz de servir para los criterios RSRP y SINR.

No obstante, a pesar de que la ganancia en el número de UEs que es capaz de servir la red es más modesta en el escenario 2, el criterio LBCSM permite mejorar notablemente la relación entre las prestaciones de los mUEs y las de los rUEs, tal y como se muestra en la Figura 5.20, en la que se representa la CDF del porcentaje de TUs descartados, separando los resultados entre mUEs y rUEs, para el caso en el que el número medio de UEs desplegados en cada DeNB (\overline{NUE}) es 81. Cuando se emplea el criterio que se basa exclusivamente en la SINR, las peores prestaciones las obtienen los mUEs, debido a la falta de recursos en los enlaces directos de los sectores para satisfacer sus requisitos de QoS. Esto es debido a que, aunque el esquema dinámico de RA trata de ajustar el reparto de recursos en función de la demanda de tráfico de los nodos, la distribución de recursos frecuenciales tiene que satisfacer las restricciones de ICIC (recogidas en la Tabla 5.8).

Cuando se emplea el criterio que se basa exclusivamente en la RSRP se conectan menos UEs a los DeNBs si se compara con el criterio SINR, y por ello las prestaciones de los mUEs son mejores gracias a una mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces directos. De hecho, para el caso de emplear el criterio RSRP son los rUEs los que obtienen las peores prestaciones. La Figura 5.20 muestra los resultados para el caso concreto en el que \overline{NUE} es 81, por lo que los enlaces directos aún no están muy sobrecargados cuando se emplea el criterio RSRP. Respecto a los rUEs, las prestaciones que obtienen para el criterio RSRP son peores que las obtenidas para el criterio SINR. Para el criterio RSRP, una mayor cantidad de UEs se conectan a los RNs, y esos rUEs adicionales generalmente se encuentran más alejados de los RNs que les dan

servicio. Además, como el criterio basado en la RSRP no comprueba si reciben fuertes niveles interferentes de los DeNBs adyacentes, estos rUEs adicionales sufren mayores descartes de paquetes, degradándose la CDF del porcentaje de TUs descartados. No obstante, a pesar de que los rUEs ven degradadas sus prestaciones, el porcentaje global de TUs descartados es más bajo cuando se emplea el criterio RSRP que cuando se emplea el criterio SINR, gracias a la mejora de prestaciones de los mUEs.

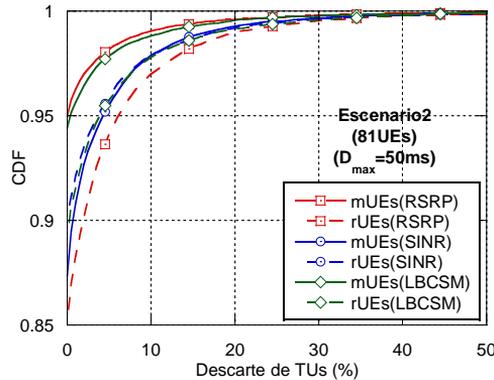


Figura 5.20: CDF del porcentaje de TUs descartados para el escenario 2 ($\overline{NUE} = 81$) ($D_{max}^u = 50ms$)

Finalmente, el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM) es el que proporciona la mejor CDF del porcentaje de TUs descartados, gracias que es capaz de traspasar UEs de forma eficiente de los DeNBs que están congestionados a los RNs. Si en primer lugar se compara con el criterio SINR, el criterio LBCSM es capaz de mejorar notablemente las prestaciones de los mUEs, gracias a reducir la carga de tráfico de los DeNBs, mejorando la disponibilidad de recursos en los enlaces directos. Además, las prestaciones de los rUEs son solo ligeramente degradadas, ya que los UEs que son traspasados a los RNs pueden aprovecharse de la mayor disponibilidad de recursos en los enlaces de acceso y enlaces backhaul. Si los resultados obtenidos para el criterio LBCSM se comparan ahora con los obtenidos para el criterio RSRP, las prestaciones que obtienen los rUEs son mejores cuando se emplea el criterio LBCSM, a pesar de que en ambos casos se conectan a los RNs un número similar de UEs. Esto es gracias a que el criterio LBCSM selecciona para ser transferidos a los RNs a aquellos UEs que observan los mejores niveles de SINR de los RNs, por lo tanto, a pesar de que reciben mejores niveles de SINR del DeNB, son capaces de alcanzar buenas prestaciones y satisfacer sus requisitos de QoS.

En la Figura 5.21 se representa la CDF del porcentaje de desviación, calculado de acuerdo a la ecuación (5.57), entre el número de RBs que se ha

estimado que debería recibir cada nodo ($NRB_{est,directos,s}$ y $NRB_{est,backhaul,r}$), y el número de RBs que el esquema dinámico de RA-ICIC ha sido capaz de asignar a cada nodo ($NRB_{asig,n}$) satisfaciendo las restricciones de ICIC. Los resultados se muestran para el caso concreto en el que el número medio de UEs desplegados en cada DeNB (\overline{NUE}) es 81, aplicándose el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM). Respecto a los enlaces backhaul, la desviación se puede considerar despreciable en prácticamente todos los casos. En relación a los enlaces directos, en los casos en los que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer los RBs estimados, la desviación es inferior al 20% en la mayoría de ellos. Los resultados están en línea con los analizados para el escenario 1, y con los analizados en el subapartado 5.4.2, con la principal diferencia de que la desviación alcanzada en los enlaces backhaul es despreciable en el escenario 2, debido a que en este escenario las demandas de tráfico de los RNs son más bajas.

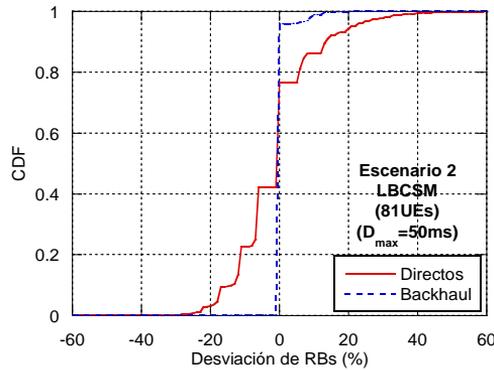


Figura 5.21: CDF del porcentaje de desviación entre el número de RBs que se ha estimado que debería recibir cada nodo y el número de RBs que el algoritmo de RA realmente asigna a cada nodo para el escenario 2 ($\overline{NUE} = 81$) ($D_{max}^u = 50$ ms)

En la Figura 5.22 se representa el porcentaje de TUs descartados para el escenario 2, cuando se incrementa la cota máxima de retardo (D_{max}^u) a 150 ms. Si se compara con los resultados obtenidos cuando D_{max}^u es 50 ms (Figura 5.19), puede verse que el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo $Cota_{desc}^{obj}$ es mayor, ya que la cota de retardo es menos restrictiva. Las conclusiones son similares en ambas situaciones, y el criterio de selección de nodo propuesto (LBCSM) es el que ofrece las mejores prestaciones. Gracias a que el criterio LBCSM, además de considerar el nivel de SINR recibido por los UEs de los diferentes nodos, también considera la distribución de la carga de tráfico, es capaz de transferir parte de los UEs que reciben mayores niveles de SINR del DeNB a los RNs, reduciendo la saturación de los enlaces directos, y mejorando la utilización de los recursos frecuenciales disponibles en el sistema. El criterio LBCSM logra una ganancia del 4% en el número de UEs que es capaz

de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS, considerando los 101 UEs que es capaz de servir para el criterio LBCSM, frente a los 97 UEs que es capaz de servir para el criterio RSRP.

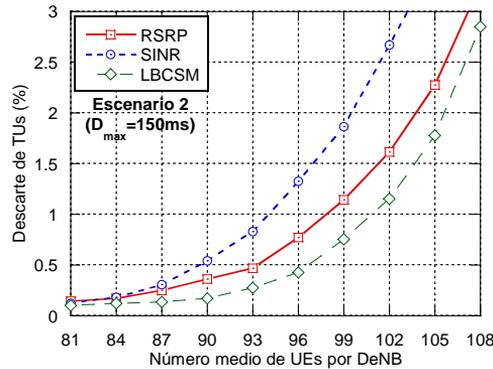


Figura 5.22: Porcentaje de TUs descartados para el escenario 2, cuando la cota máxima de retardo (D_{max}^u) se incrementa a 150ms

Los resultados analizados para el escenario 2 muestran que la ganancia proporcionada por el criterio de selección de nodo propuesto en el número de UEs a los que es capaz de dar servicio el sistema, en situaciones en las que las demandas de tráfico de los DeNBs son elevadas, es más modesta. El criterio LBCSM es capaz de transferir parte de los UEs que reciben mejores niveles de SINR de sus DeNBs a los RNs, disminuyendo la carga de tráfico de los DeNBs, y mejorando las prestaciones del sistema, gracias a aprovechar la mayor disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces de acceso y en los enlaces backhaul. Sin embargo, encontrar UEs candidatos a ser transferidos a los RNs, es decir, UEs que aun recibiendo mayores niveles de SINR de su DeNB reciban un nivel de SINR de uno de los RNs por encima del umbral ($SINR_{TH}^{cand}$), es más difícil, debido a que el área de cobertura de los RNs es más reducida. No obstante, el criterio LBCSM también mejora la relación entre las prestaciones alcanzadas por mUEs y rUEs frente a los criterios RSRP y SINR, tal y como se ha visto en la Figura 5.20.

5.5 Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un algoritmo que combina, un esquema dinámico de RA-ICIC para adaptar la distribución de recursos frecuenciales ante condiciones de carga heterogéneas, y un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga, buscando conectar a los usuarios al nodo que proporciona una mejor utilización de los recursos frecuenciales siempre que sea posible. El algoritmo estima la cantidad de recursos que debería recibir cada sector y cada RN, adaptando el reparto de recursos frecuenciales entre enlaces

directos y enlaces backhaul, pero siempre satisfaciendo las restricciones impuestas por el esquema de ICIC, para garantizar condiciones de transmisión aceptables para los diferentes enlaces. El criterio de selección de nodo, además de considerar el nivel de SINR que los UEs reciben de los diferentes nodos, también tiene en cuenta la distribución de carga, de tal forma que intenta conectar al UE al nodo del que recibe mejores niveles de SINR que pueda garantizar sus requisitos de QoS. Además, el criterio de selección de nodo también considera un proceso de redistribución de UEs, que trata de alcanzar una distribución de carga más eficiente, con el objetivo de que todos los usuarios obtengan prestaciones similares.

Los resultados muestran que el esquema dinámico de RA-ICIC propuesto es capaz de repartir los recursos frecuenciales entre los enlaces directos y los enlaces backhaul de forma eficiente, bajo condiciones de demanda de tráfico heterogéneas, satisfaciendo la distribución de recursos deseada para los enlaces backhaul en el 80% de los casos, y obteniendo desviaciones menores al 25% en la mayoría de los casos en los que no es capaz de satisfacer la distribución deseada para enlaces backhaul y para enlaces directos. Se cuenta también con cierta flexibilidad en las asignaciones de los enlaces directos, que permite compensar aquellas situaciones en las que el esquema dinámico de RA no es capaz de satisfacer la distribución deseada. Además, el esquema dinámico de RA es capaz de adaptar la distribución de recursos frecuenciales sin degradar excesivamente la calidad de las transmisiones de los enlaces directos y de los enlaces backhaul.

El criterio de selección de nodo propuesto, aplicado junto con el esquema dinámico de RA-ICIC, permite mejorar las prestaciones de criterios basados exclusivamente en las medidas de RSRP y de SINR, bajo condiciones de demanda de tráfico heterogénea. Considerando las condiciones de carga de los nodos, el criterio de selección de nodo propuesto (LBSCM) es capaz de distribuir la carga de tráfico, evitando que los nodos con mayores demandas de tráfico degraden las prestaciones del sistema. Especialmente relevantes son los resultados obtenidos en escenarios en los que las demandas de tráfico de los RNs son elevadas (escenario 1), ya que el criterio propuesto es capaz de transferir parte de los UEs que se encuentran en los alrededores de los RNs a los DeNBs, reduciendo la demanda de tráfico de los RNs, y aprovechando la disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces directos. Además, como el criterio de selección de nodo escoge para ser transferidos a aquellos UEs que observan las mejores condiciones de canal respecto al DeNB, estos UEs son capaces de satisfacer sus requisitos de QoS, incrementándose la cantidad de UEs a los que el sistema es capaz de dar servicio. En situaciones en las que las demandas de tráfico de los DeNBs son elevadas (escenario 2), la ganancia proporcionada por el criterio de selección de nodo propuesto es más modesta, ya que, debido a la

reducida área de cobertura de los RNs, es más difícil encontrar UEs que sean candidatos a ser transferidos a los RNs. No obstante, el criterio propuesto también mejora la relación entre las prestaciones alcanzadas por mUEs y rUEs frente a los criterios basados exclusivamente en las medidas de RSRP y de SINR. En el escenario 1, el criterio de selección de nodo propuesto logra una ganancia alrededor del 20% (111 UEs / 93 UEs) en el número de UEs que es capaz de servir la red satisfaciendo los requisitos de QoS cuando D_{max}^u es 50 ms, y una ganancia del 17% (125 UEs / 107 UEs) cuando D_{max}^u es 150 ms. Respecto al escenario 2 las ganancias son más modestas, llegando al 6% (87 UEs / 82 UEs) cuando D_{max}^u es 50 ms, y al 4% (101 UEs / 97 UEs) cuando D_{max}^u es 150 ms.

Capítulo 6

Estrategias de Control de Admisión para Redes Macrocelulares

Uno de los mecanismos empleados por las redes de acceso celular para la gestión de recursos radio es el control de admisión (CAC: Call Admission Control). Como se ha visto, en LTE-A la estación base es la encargada de gestionar los recursos radio y, por lo tanto, de decidir qué RBs son asignados a cada conexión y con qué potencia se transmite sobre ellos. Los algoritmos de scheduling tratan de asignar los recursos de forma eficiente para satisfacer los requisitos de QoS de todos los usuarios conectados a la celda. Sin embargo, los recursos frecuenciales son limitados y si la estación base aceptase todas las conexiones que solicitan recursos, podría llegar un momento en el que la demanda de recursos fuera superior a los recursos frecuenciales disponibles. Esta situación provocaría una degradación en las prestaciones de todos los usuarios admitidos y, en la medida de lo posible, debe ser evitada en todo momento. Para ello se emplean mecanismos de control de admisión.

La principal funcionalidad del CAC es la de aceptar o rechazar nuevas conexiones que intentan acceder a la celda, teniendo en cuenta diferentes aspectos como pueden ser el estado de carga de la celda, los requisitos de QoS de la nueva conexión, etc. El objetivo es tratar de garantizar unas prestaciones aceptables a todos los usuarios a los que se da servicio. Por lo tanto, cuando una conexión solicita ser servida por una celda, el control de admisión analiza la conveniencia de admitirla, y para ello el CAC debe ser capaz de estimar la capacidad disponible, así como el impacto que tendría la admisión de la nueva conexión en el consumo global de recursos. Esta estimación de la capacidad

disponible, del consumo de las nuevas conexiones puede no ser simple, ya que el comportamiento de las estrategias de RRM puede ser diferente dependiendo de la distribución espacial de los usuarios, de las condiciones de canal que estén experimentando, de la movilidad de los usuarios, etc. El objetivo final es que se garantice la satisfacción de los requisitos de QoS de todos los usuarios que son admitidos en el sistema.

En términos generales, el CAC suele englobar dos aspectos: por un lado, el cálculo de la capacidad del nodo y el consumo de recursos de los usuarios y, por otro lado, aplicar políticas de admisión, las cuales definen las condiciones que deben darse para que una nueva conexión sea aceptada. El primer aspecto tiene como objetivo estimar los recursos que están siendo consumidos por las conexiones en curso y estimar los recursos que requerirán las nuevas conexiones (conexiones nuevas o provenientes de un handover) que soliciten servicio a la celda. Estos cálculos o estimaciones pueden basarse en distintos parámetros de las conexiones como las condiciones de canal que está experimentando el usuario, la distancia del usuario con la estación base, las características estadísticas del tráfico y los requisitos de QoS del servicio asociado a la conexión. Además, una estimación ajustada del consumo de recursos dependerá de la propia implementación de las estrategias de asignación de recursos y de la capacidad de las mismas para conseguir el máximo aprovechamiento posible de los recursos disponibles.

El segundo aspecto del control de admisión hace referencia a las políticas de admisión, las cuales definen las condiciones que deben satisfacerse en el sistema para que la nueva conexión sea admitida. Para su definición, generalmente se emplean las estimaciones de consumo de recursos indicadas anteriormente. El objetivo final de las políticas de admisión es evitar que se sobrepase la capacidad total de la celda, intentando satisfacer los requerimientos de todos los usuarios admitidos en el sistema.

A continuación se presenta una revisión del estado del arte contemplando diferentes estrategias de control de admisión para redes LTE-A. Posteriormente se proponen y evalúan algunas estrategias básicas de CAC derivadas de estrategias propuestas en la literatura. Partiendo de la estrategia básica que mejores prestaciones ofrece, se proponen y evalúan varias estrategias que buscan minimizar la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones, a la vez que garantizar que siempre se satisfacen los requisitos de QoS de los UEs que son admitidos, evitando la degradación de prestaciones cuando el número de UEs que intentan acceder a la red es elevado.

6.1 Estado del arte

Como se ha comentado, uno de los aspectos que engloban los mecanismos de CAC es la estimación de la capacidad de la celda y el consumo de recursos de los usuarios. Sin embargo, esta estimación no es simple, ya que depende de una gran variedad de factores, como pueden ser el comportamiento de las estrategias de RRM, la distribución y movilidad de los UEs, el tipo de tráfico cursado por los UEs, las condiciones de canal e interferencia observadas por los UEs, etc. En la literatura pueden encontrarse diversos planteamientos para obtener esta estimación y en este apartado se revisan algunas de las propuestas más relevantes que se han encontrado.

En [65] proponen un modelo analítico para estimar los recursos frecuenciales que se necesitan para satisfacer los requisitos de tráfico de los UEs de una celda. No obstante, para poder obtener este modelo analítico consideran un modelado del sistema bastante simplificado. En concreto consideran el despliegue de una red de macroceldas formada por una celda central y sus seis celdas vecinas, sobre la que se aplica un reuso frecuencial unidad. Sin embargo, no consideran un esquema de ICIC entre macroceldas, y la potencia de transmisión por RB es la misma en todas las celdas, sin aplicarse ningún proceso de adaptación de potencia. Respecto al modelado del canal físico no tienen en cuenta desvanecimientos lentos ni rápidos. Como además el sistema de antenas considerado en los eNBs está formado por una antena omnidireccional, la señal que recibe un UE tanto del eNB que le da servicio como de los eNBs adyacentes, depende únicamente de la distancia entre el UE y el eNB. Finalmente, consideran que los UEs permanecen estáticos sin desplazarse por la red, y aplican un modelo de tráfico en el que el eNB genera una tasa de datos constante para cada UE. Teniendo en cuenta estas simplificaciones derivan la CDF de la ISR (Interference to Signal Ratio), que se obtiene como el inverso de la SIR (Signal to Interference Ratio) (6.1).

$$ISR = \frac{1}{SIR} \quad (6.1)$$

Con la CDF de la ISR, y aplicando la fórmula de Shannon, obtienen la probabilidad de que un UE requiera N RBs para satisfacer su tasa requerida, y considerando estas probabilidades obtienen el número promedio de RBs que requiere un UE. Finalmente, teniendo en cuenta que los UEs se distribuyen de forma homogénea con una determinada densidad de UEs por m^2 , se obtiene la estimación del número de RBs que requiere la celda para satisfacer los requisitos de tasa de los UEs. Si bien este modelo permitiría obtener una primera estimación del consumo de RBs de los UEs de una celda, su aplicación en un

escenario más realista conllevaría una estimación poco precisa debido a todas las simplificaciones que se han considerado.

En [66] los autores también proponen un modelo analítico para estimar los recursos frecuenciales necesarios para satisfacer las tasas requeridas de los UEs, pero en este caso consideran un modelado más complejo. Respecto al despliegue de la red, consideran una única celda, aunque tienen en cuenta la interferencia proveniente de una celda vecina. Las conexiones llegan a la celda siguiendo un proceso de Poisson y el tiempo que una conexión permanece activa en la celda se modela mediante una distribución exponencial. Las nuevas conexiones se generan de forma uniforme por toda el área de la celda y los UEs se mueven libremente dentro de la celda. Consideran un modelo de tráfico en el que el eNB genera una tasa de datos constante para cada UE. El modelo analítico se basa en dividir la celda en diferentes zonas, donde cada zona se corresponde con el área de la celda en la que los UEs pueden recibir datos con un MCS determinado. Asumen que el tiempo que un UE permanece en una zona antes de moverse a una zona adyacente sigue una distribución exponencial. Teniendo en cuenta estas consideraciones, emplean una cadena de Markov en tiempo continuo para modelar el sistema y obtener las probabilidades de que el sistema se encuentre en un estado determinado x , donde x representa un vector que almacena el número de UEs existentes en cada una de las zonas. Como los UEs de cada zona emplean la misma MCS, teniendo en cuenta la tasa requerida de los UEs obtienen los recursos frecuenciales consumidos por los UEs para cada estado x . Finalmente, empleando las probabilidades para cada estado del sistema x se puede estimar el consumo promedio de la celda.

Aunque el modelado del sistema empleado en [66] es más completo que el considerado en [65], se siguen quedando fuera del análisis aspectos tan importantes como la interferencia generada por una red formada por un mayor número de celdas, o el algoritmo de scheduling empleado, o el esquema de ICIC, que son aspectos que como se ha visto durante la tesis tienen un fuerte impacto en las prestaciones de la red. Por lo tanto, estos modelos analíticos presentados en [65, 66] permitirían obtener una primera aproximación del consumo de RBs asociados a una celda, pero su aplicación en mecanismos de CAC para escenarios reales queda bastante limitada, debido principalmente a las simplificaciones que se asumen para obtener el modelo, pero también a la variabilidad de la demanda de tráfico, a la variabilidad de las condiciones de canal observadas por los UEs, etc.

Junto con la estimación de la demanda de RBs de los UEs, el segundo aspecto que suelen englobar los mecanismos de CAC son las políticas de admisión. Las políticas emplean generalmente estas estimaciones de la demanda de RBs para decidir si una nueva conexión debe ser aceptada o no, y su objetivo

final es evitar que se sobrepase la capacidad total de la celda para garantizar que se satisfacen los requisitos de QoS de todos los usuarios admitidos en el sistema. En la literatura pueden encontrarse diversas propuestas que abordan la problemática de las políticas de admisión en redes macrocelulares desde diferentes ángulos [67]. Si se considera el modo en el que se asignan los recursos frecuenciales en el sistema, existen dos estrategias ampliamente extendidas como son Complete Partitioning (CP) y Complete Sharing (CS) [68–70]. La idea principal de la estrategia CP es dividir el ancho de banda disponible en el sistema en diferentes subbandas, y cada subbanda se reserva para UEs de un determinado grupo. Esta división de UEs puede realizarse en base a diferentes criterios, como agrupar los UEs que cursan un mismo tipo de tráfico, o agrupar los UEs que son prioritarios frente a los UEs convencionales, o agrupar los UEs en función de su zona dentro de la celda, etc. Por lo tanto, cuando un nuevo UE trata de establecer una conexión en la celda, este UE solo es aceptado si existen recursos suficientes en su subbanda correspondiente. Este tipo de estrategias permite un gran control de las probabilidades de bloqueo de conexiones para los diferentes grupos de UEs, pero a costa de reducir la utilización de los recursos frecuenciales del sistema.

Por otro lado, en las estrategias CS se permite acceder a todos los UEs a todo el ancho de banda disponible en la red. Por lo tanto, un UE solo es rechazado cuando no existen suficientes recursos disponibles en la celda para satisfacer su demanda. Las estrategias CS permiten maximizar la utilización de los recursos frecuenciales, pero a costa de no ofrecer un tratamiento diferenciado a UEs de diferentes tipos, o a UEs con diferentes prioridades. Entre las estrategias CP y CS existen variedad de estrategias híbridas que tratan de alcanzar un compromiso entre ambos casos.

En [71] los autores presentan una propuesta para realizar el reparto de recursos frecuenciales entre diferentes tipos de servicio para una estrategia CP. Consideran una única celda, por lo que la propuesta no considera el efecto de la ICI, aunque se ha visto que tiene un impacto muy significativo en las prestaciones de las redes. Emplean tres tipos de servicio diferentes (VoIP, streaming de video y FTP) y asignan un coste por bit para cada uno de ellos, considerando que el coste de las clases de tráfico prioritarias (según el valor de su QoS Class Identifier (QCI)) es más alto, que el coste de las clases de tráfico menos prioritarias. Por lo tanto, asignan el coste más alto al tráfico VoIP, un coste intermedio al streaming de video y el coste más bajo al tráfico FTP. Los autores emplean estos costes por bit para priorizar a las clases de tráfico que tienen asociado un mayor coste, ya que asumen que son las que mayor beneficio económico aportan a los operadores. Una vez fijada una probabilidad de bloqueo umbral para todo el sistema ($P_{bloq,TH}$), mediante la ecuación (6.2) derivan la

probabilidad de bloqueo umbral para cada clase de tráfico m : $P_{bloq,TH}^m \cdot C_m$ es el coste de la clase de tráfico m , y \bar{C} es el coste promedio de todas las clases de tráfico consideradas. De acuerdo a esta ecuación, se establece una probabilidad de bloqueo más baja para aquellos tráficos con mayor coste.

$$P_{bloq,TH}^m = P_{bloq,TH} \cdot \left(1 - \frac{C_m - \bar{C}}{\bar{C}} \right) \quad (6.2)$$

Basándose en estas probabilidades de bloqueo umbrales ($P_{bloq,TH}^m$), la propuesta considera un algoritmo que consiste en ir reservando RBs a cada clase de tráfico m , hasta que la probabilidad de bloqueo estimada para esa clase cae por debajo del umbral $P_{bloq,TH}^m$. El algoritmo comienza reservando recursos para la clase de tráfico más prioritaria, y después continua con la siguiente clase de tráfico por orden de prioridad. Estiman la cantidad de RBs requeridos por un UE que cursa la clase de tráfico m (NRB_{req}^m) a partir de la tasa de datos requerida para cada clase de tráfico m (T_{req}^m) y de una eficiencia promedio por RB a nivel de celda ($\bar{\eta}_c$), que se obtiene empleando la fórmula de Shannon con un valor promedio de SNR (Signal to Noise Ratio) para todos los UEs de la celda (\overline{SNR}_c) (6.3). En cada iteración del algoritmo se reservan NRB_{req}^m adicionales para la clase de tráfico m ($N_{total,m} = N_{total,m} + NRB_{req}^m$), y se estima la nueva probabilidad de bloqueo teniendo en cuenta que se admitiría a un UE adicional que cursa la clase de tráfico m ($s_m = s_m + 1$). Una vez que la estimación de la probabilidad de bloqueo (P_{bloq}^m) está por debajo de la probabilidad umbral para esa clase m ($P_{bloq,TH}^m$), el algoritmo pasa a considerar la siguiente clase de tráfico.

$$NRB_{req}^m = \frac{T_{req}^m}{\bar{\eta}_c} \quad (6.3)$$

Para estimar la probabilidad de bloqueo emplean la fórmula Erlang B (6.4), considerando el número de UEs que se admitirían en los $N_{total,m}$ RBs disponibles para la clase m (s_m), y la cantidad de tráfico ofrecido en Erlangs (a_m), obtenida a partir del cociente entre la tasa promedio de llegada de UEs que cursan la clase m (λ_m), y el tiempo promedio de duración de las conexiones de la clase m (μ_m). Como $P_{bloq,TH}^m$ es menor para las clases de tráfico prioritarias, la propuesta reservará más recursos frecuenciales para las clases prioritarias.

$$P_{bloq}^m(s_m, a_m) = \frac{(a_m)^{s_m}}{\sum_{k=0}^{s_m} \frac{(a_m)^k}{k!}}, \quad a_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m} \quad (6.4)$$

Una vez que se han estimado las subbandas para cada clase de tráfico, la política de admisión considerada es la que se expresa en la ecuación (6.5), donde $NRB_{cons,c}^m(t)$ es el número de RBs actualmente consumidos por los UEs que cursan la clase de tráfico m (U_c^m).

$$NRB_{cons,c}^m(t) + NRB_{req}^m \leq N_{total,m} \quad (6.5)$$

con

$$NRB_{cons,c}^m(t) = \sum_{\forall u \in U_c^m} NRB_{req}^m$$

Una de las principales limitaciones de esta propuesta es que la estimación del número de RBs requeridos por un UE que cursa la clase de tráfico m (NRB_{req}^m) se obtiene de forma bastante simplificada. Se está considerando un valor promedio de SNR para todos los UEs de la celda, lo cual permite obtener una aproximación del número de RBs promedio que se requieren para cursar la clase de tráfico m , pero las condiciones de canal e interferencia (no considerada en la propuesta) dependen mucho de la ubicación de los UEs en la celda y tienen una alta variabilidad en el tiempo. Además, tampoco se tiene en cuenta el algoritmo de scheduling empleado, ni un esquema de ICIC, que son dos aspectos que tienen un gran impacto en la accesibilidad de los RBs y en las estimaciones de los RBs consumidos por los UEs. Esto puede conllevar que los cálculos de las subbandas reservadas para cada clase m ($N_{total,m}$) no se ajusten a la realidad, provocando un uso ineficiente de los RBs disponibles y probabilidades de bloqueo más altas que las definidas como umbral ($P_{bloq,TH}^m$).

En [72] los autores proponen una política de admisión basada en la estrategia CS, pero considerando un factor de ocupación máximo y un ratio de bloqueo diferente según el tipo de tráfico cursado por el UE, según se trate de una conexión nueva o de una conexión procedente de una celda vecina (handover) y según las condiciones de canal observadas por el UE. Respecto al despliegue de la red, consideran una única celda, por lo que la propuesta no tiene en cuenta la aplicación de esquemas de ICIC. Emplean tres modelos de tráfico diferentes (VoIP, streaming de video y FTP), y consideran que los UEs se distribuyen de forma uniforme sobre el área de la celda. Consideran diferentes tasas de llegada de nuevas conexiones a la celda, así como diferentes tasas de llegada de conexiones procedentes de handover, ya que el despliegue de red está formado

En [73] proponen una política de admisión basada en la estrategia CS, sobre la que consideran un factor adaptativo que tiene en cuenta la carga de la celda y las condiciones de SINR que observa el UE que trata de acceder. Este factor adaptativo multiplica la estimación de la demanda de RBs del UE que trata de acceder a la celda, favoreciendo a los UEs que observan buenas condiciones de canal y dificultando el acceso de nuevos UEs cuando la carga de la celda es alta. Consideran el despliegue de una red celular con reuso frecuencial unidad, pero no consideran un esquema de ICIC que permita mejorar las prestaciones de la red. Los usuarios se distribuyen de forma uniforme sobre la red. La política de admisión considerada se representa en la ecuación (6.7), y de forma similar a la propuesta anterior también se considera un factor de ocupación (F_{ocup}), aunque en este caso es el mismo para toda la red, y su objetivo es reservar una porción de los recursos frecuenciales para aquellas situaciones en las que las condiciones de canal de ciertos UEs admitidos en la celda empeoran (debido a su movilidad, condiciones de interferencia, etc.) y necesitan más RBs para satisfacer sus requisitos de QoS. La desventaja de esta reserva de recursos es que se limita la cantidad de RBs a los que se permite acceder a los UEs en la política de admisión, incrementándose la probabilidad de bloqueo de nuevos UEs.

$$NRB_{cons,c}(t) + F_s^u \cdot NRB_{req}^u \leq F_{ocup} \cdot N_{total,c}$$

con

$$NRB_{cons,c}(t) = \sum_{\forall u' \in U_c} NRB_{req}^{u'} \quad (6.7)$$

El consumo de RBs de los UEs admitidos en la celda y la demanda de RBs del nuevo UE que intenta acceder se estiman mediante la ecuación (6.8), teniendo en cuenta la tasa promedio requerida por cada UE u (T_{req}^u) y una eficiencia promedio por RB a nivel de celda ($\bar{\eta}_c$), obtenida empleando la fórmula de Shannon y el valor de SINR promedio de los UEs actualmente admitidos en la celda (\overline{SINR}_c).

$$NRB_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_c} \quad (6.8)$$

La propuesta considera el factor F_s^u , que depende de la SINR observada por el UE u que intenta acceder a la celda, y de las condiciones actuales de carga de la celda, y se calcula mediante la ecuación (6.9). σ es el factor que tiene en cuenta la carga de la celda y se obtiene empleando la ecuación (6.10), donde β_1 y β_2 son parámetros del sistema que permiten ajustar el peso que tiene la carga de la celda en el factor F_s^u . U_c es el conjunto de UEs conectados a la celda c y $|U_c|$ permite obtener la cardinalidad del conjunto, de tal forma que equivale al

número total de UEs de la celda. Si la SINR observada por el UE u que intenta acceder a la celda ($SINR_u$) es superior a la SINR promedio de los UEs conectados a la celda (\overline{SINR}_c) se considera $F_s^u = 1$, y por lo tanto se emplean directamente los RBs requeridos por el UE (NRB_{req}^u) en la política de admisión. Por el contrario, cuando $SINR_u$ está por debajo de \overline{SINR}_c , el factor F_s^u toma un valor superior a 1, dificultando el acceso del UE u a la celda. Cuanto menor sea la SINR observada por el UE u , y cuanto mayor sea la carga de la celda, mayor será el valor de F_s^u , y más difícil será que el UE u sea admitido por el mecanismo de CAC.

$$F_s^u = \begin{cases} 1 - \sigma \cdot \log \left(\frac{SINR_u + |U_c|}{\overline{SINR}_c + |U_c|} \right), & SINR_u < \overline{SINR}_c \\ 1, & SINR_u \geq \overline{SINR}_c \end{cases} \quad (6.9)$$

$$\sigma = \beta_1^{(\beta_2 \cdot (\rho_c(t) - 1/2 \cdot F_{ocup}))}, \quad \text{con } \rho_c(t) = \frac{NRB_{cons,c}(t)}{N_{total,c}} \quad (6.10)$$

En esta propuesta, el número de RBs que requiere cada UE u para satisfacer su demanda de tasa de datos se estima de forma similar a la propuesta en [71], obteniéndose de forma teórica y considerando un valor promedio de SINR para toda la celda. Además, tampoco se está teniendo en cuenta el algoritmo de scheduling empleado, ni un esquema de ICIC, ni la zona de la celda en la que trata de acceder el UE. Por lo tanto, las estimaciones del consumo de RBs de los UEs actualmente admitidos, así como la estimación de la demanda de RBs del UE que intenta acceder a la celda, pueden diferir sustancialmente de la situación real, provocando una menor eficiencia del mecanismo de CAC.

Las propuestas previas [71–73] consideran estrategias muy interesantes relativas a la política de admisión, sin embargo, una limitación bastante relevante que comparten todas ellas es que no tienen en cuenta ni las particularidades del algoritmo de scheduling, ni el esquema de ICIC empleado para diseñar el mecanismo de CAC. Ambos aspectos tienen una gran influencia en las estimaciones del consumo de RBs y de la capacidad de la celda, además de en la propia política de admisión, de cara a tener en cuenta los recursos frecuenciales a los que realmente puede acceder el nuevo UE en función de su ubicación dentro de la celda, o en función de sus condiciones de canal.

En [74] se propone un modelo analítico para estimar la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones y la probabilidad de pérdida de conexiones provenientes de handover, para una red sobre la que se considera un esquema SFR como esquema de ICIC. La política de admisión considerada en la propuesta está adaptada a las características del esquema SFR. Las conexiones

nuevas llegan a la celda siguiendo un proceso de Poisson con una tasa λ_n y el tiempo que una conexión permanece activa en la celda se modela mediante una distribución exponencial. Consideran que para el desarrollo del modelo analítico una celda es suficiente, y aplican una tasa de llegada de conexiones procedentes de handover (λ_h) para simular las conexiones provenientes de las celdas vecinas. Dividen la celda en dos zonas, de tal forma que catalogan a los UEs como interiores o exteriores.

La política de admisión propuesta en [74] se expresa en la ecuación (6.11), y aplica una política diferente según se trate de un nuevo UE interior que trata de acceder a la celda, de un nuevo UE exterior que trata de acceder a la celda o de un UE procedente de un handover que trata de acceder a la celda (UE exterior). Los UEs interiores son admitidos en la celda siempre que existan suficientes RBs para satisfacer su demanda (NRB_{req}^u), siendo $NRBint_{cons,c}(t)$ el número de RBs de la subbanda interior consumidos en la celda, $NRBext_{cons,c}(t)$ el número de RBs consumidos de la subbanda exterior y $N_{total,c}$ el número total de RBs disponibles en el sistema. En el caso de que se trate de un nuevo UE exterior, se permitirá su admisión si quedan suficientes RBs libres en la subbanda exterior ($N_{total,ext,c}$), pero considerando el factor $F_{ocup,ext}$ para dejar libre un cierto margen de RBs en la subbanda exterior para las llamadas procedentes de handover. En el caso de los UEs exteriores la política considera el número de RBs de la subbanda exterior que son consumidos por UEs exteriores ($NRBext_{cons,c}^{UEext}(t)$). Los UEs interiores pueden acceder a todos los recursos, tanto de la subbanda interior como de la exterior, sin embargo, consideran que, si un UE exterior trata de acceder a la celda, y no quedan suficientes RBs libres en la subbanda exterior porque son consumidos por un UE interior, el sistema rechaza a este UE interior para permitir el acceso al UE exterior.

◦ Si es un nuevo usuario interior, solo se acepta si:

$$NRBint_{cons,c}(t) + NRBext_{cons,c}(t) + NRB_{req}^u \leq N_{total,c}$$

◦ Si es un nuevo usuario exterior, solo se acepta si:

$$NRBext_{cons,c}^{UEext}(t) + NRB_{req}^u \leq F_{ocup,ext} \cdot N_{total,ext,c} \quad (6.11)$$

◦ Si es un usuario que realiza handover, solo se acepta si:

$$NRBext_{cons,c}^{UEext}(t) + NRB_{req}^u \leq N_{total,ext,c}$$

Los autores emplean cadenas de Markov de tres dimensiones para modelar el sistema, y obtener las probabilidades de que el sistema se encuentre en un estado determinado x , donde x representa un vector que almacena el número de nuevos

UEs interiores, el número de nuevos UEs exteriores y el número de UEs provenientes de un handover. Una vez que se tienen las probabilidades para cada estado x , derivan la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones y la probabilidad de pérdida de conexiones provenientes de handover.

La reserva de recursos para las conexiones provenientes de handover permite reducir la probabilidad de pérdida de estas conexiones, sin embargo, se incrementa la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones en la zona exterior de la celda. Por lo tanto, se prioriza no cortar una conexión en curso cuando los UEs se desplazan a celdas vecinas, frente al acceso de nuevas conexiones. Hay que tener en cuenta que, según la política de admisión considerada, los nuevos UEs que tratan de acceder a la celda, y que se encuentran en la zona exterior de la misma, solo acceden a los recursos de la subbanda exterior. Por lo tanto, si además se considera un $F_{ocup,ext}$ la probabilidad de bloqueo en la zona exterior puede ser elevada, y bastante más alta que la probabilidad de bloqueo en las zonas interiores, ya que los UEs interiores acceden a la totalidad de los recursos frecuenciales.

La propuesta presentada en [75] es muy similar, y también utilizan cadenas de Markov de tres dimensiones para modelar una red sobre la que se aplica el esquema SFR. También consideran una única celda, pero la principal diferencia es que no consideran conexiones procedentes de handover, teniendo en cuenta solo nuevas conexiones que tratan de acceder a la celda. Las conexiones nuevas llegan a la celda siguiendo un proceso de Poisson con una tasa λ_n y el tiempo que una conexión permanece activa en la celda se modela mediante una distribución exponencial. En este caso, el estado en el que se encuentra el sistema (x) tiene en cuenta el número de UEs interiores que consumen RBs de la subbanda interior, el número de UEs interiores que consumen RBs de la subbanda exterior y el número de UEs exteriores que consumen RBs de la subbanda exterior. El modelo analítico permite obtener la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones.

La política de admisión es muy similar a la presentada en la ecuación (6.11), con la diferencia de que no se aplica el factor $F_{ocup,ext}$ para los nuevos UEs exteriores al no considerarse conexiones provenientes de handover de celdas vecinas. De igual forma que en la propuesta anterior, los UEs interiores pueden acceder a los recursos de ambas subbandas, sin embargo, también se considera la posibilidad de rechazar la conexión en curso de un UE interior, si este UE está empleando RBs de la subbanda exterior y no quedan suficientes RBs libres en la subbanda exterior para admitir a un nuevo UE exterior que trata de acceder a la celda.

Las propuestas [74, 75] tienen en cuenta las características del esquema de ICIC empleado en la red a la hora de definir la política de admisión. Sin

embargo, una limitación de ambas propuestas es que consideran que $NRB_{req}^u = 1$ para todos los UEs. Esto permite simplificar el modelado del sistema, pero las probabilidades de bloqueo y pérdida de conexiones obtenidas pueden alejarse bastante en un escenario más realista, ya que la demanda de RBs de los UEs depende fuertemente de sus condiciones de canal e interferencia, así como de si los UEs reciben asignaciones en la subbanda interior o en la subbanda exterior.

Como se ha visto, solo algunas propuestas consideran la aplicación de un esquema de ICIC que permita ofrecer condiciones de interferencia adecuadas a los UEs, mejorando la eficiencia del sistema. El mecanismo de CAC se tiene que diseñar de forma conjunta con el resto de mecanismos de gestión de recursos como puede ser el scheduler, o el esquema de ICIC, ya que estos determinan la accesibilidad de los recursos frecuenciales, influyendo en el consumo de RBs de los UEs admitidos en el sistema, así como en los recursos a los que puede acceder el UE que solicita admisión en la celda. Esta es una limitación que comparten las propuestas encontradas en la literatura, ya que no consideran las características ni del scheduler ni del esquema de ICIC a la hora de estimar la capacidad de la celda y la demanda de los UEs, empleándose en la mayoría de casos modelos bastante simplificados para obtener estas estimaciones.

6.2 Enfoque general de las propuestas de CAC

En este capítulo se proponen varias estrategias para estimar el consumo de recursos de los usuarios admitidos en el sistema. Se comienza proponiendo una estimación de consumo teórica basada en la tasa que requieren los UEs para satisfacer sus requisitos de QoS y en eficiencias promedio por RB obtenidas offline. Para obtener las eficiencias promedio por RB se han llevado a cabo simulaciones empleando las mismas condiciones de evaluación que serán empleadas para evaluar las estrategias de CAC, y además se han obtenido eficiencias promedio para diferentes zonas de la celda y para las diferentes subbandas de recursos consideradas en el esquema de ICIC. El objetivo ha sido tratar de obtener valores de eficiencia que se ajusten lo máximo posible al comportamiento real del sistema, y teniendo en cuenta cómo distribuye los recursos el algoritmo de scheduling, así como las diferentes subbandas de recursos definidas por el esquema de ICIC, que son aspectos que se dejan de lado en la mayoría de propuestas encontradas en la literatura. De forma adicional, también se propone emplear medidas reales del consumo de RBs de los UEs, con el objetivo de obtener una estimación todavía más realista del consumo acumulado de las celdas. Para estimar la demanda de RBs del nuevo usuario que solicita acceso a la red se emplean las eficiencias promedio por RB, y se analiza la estrategia de considerar la subbanda de recursos a la que se cree

que accederá el nuevo usuario teniendo en cuenta el consumo acumulado de los UEs admitidos.

Empleando las estrategias de estimación del consumo y demanda de RBs propuestas, se proponen en primer lugar unas políticas de admisión básicas basadas en las estrategias CP y CS revisadas en la literatura, que se utilizarán como punto de partida y a efectos comparativos. Sobre estas estrategias básicas se proponen varias políticas en las que se introducen variaciones que persiguen mejorar las prestaciones del mecanismo de CAC. Considerar parámetros fijos en las políticas de admisión puede no ser eficiente ante variaciones en la tasa de llegada de usuarios a la red, ya que generalmente suele existir un compromiso entre ajustar los parámetros para proporcionar un buen nivel de protección y evitar degradar las prestaciones de la red por admitir a más UEs de los posibles, y ajustar los parámetros para no bloquear a demasiados UEs cuando la carga de la red no es muy elevada y se podrían haber admitido con garantías. Por ello en este capítulo se propone adaptar los parámetros de la política de admisión considerando el grado de satisfacción de los requisitos de QoS de los UEs admitidos.

Los anteriores capítulos de la tesis se han centrado en los despliegues heterogéneos con nodos de baja potencia. Sin embargo, para analizar la problemática de los mecanismos de CAC en redes LTE-A y proponer nuevas estrategias se ha decidido considerar redes homogéneas macrocelulares, dejando su extensión a despliegues heterogéneos como una futura línea de investigación.

6.2.1 Modelo del sistema y convenio de símbolos

Como en los capítulos anteriores, se consideran celdas trisectorizadas con geometría hexagonal, en las cuales, la estación base (eNB) se despliega en el centro de la celda. Asimismo, se considera una comunicación con duplexado en frecuencia (FDD), centrándose el trabajo en el enlace descendente (DL). Siguiendo las recomendaciones para el desarrollo de LTE, y tal y como se ha comentado en los capítulos anteriores, los recursos frecuenciales del sistema se dividen en RBs, los cuales representan la asignación mínima de recursos.

Como esquema de ICIC se emplea el esquema FFR_{opa} explicado en el subapartado 2.3.1. En la Figura 6.1 se representa de nuevo por comodidad la asignación de recursos de este esquema, que se caracteriza por la asignación ordenada de RBs en la subbanda interior, y por la asignación adaptativa de potencia. Merece la pena recordar que, aunque de forma inicial los recursos frecuenciales pertenecientes a la subbanda interior se dividen en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna a un sector, cuando un sector ocupa todos los RBs de su subbanda comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda. Por otro lado, para la subbanda exterior de recursos se

aplica una sectorización estricta con el objetivo de mejorar la calidad de la señal para los UEs localizados en el exterior de las celdas.

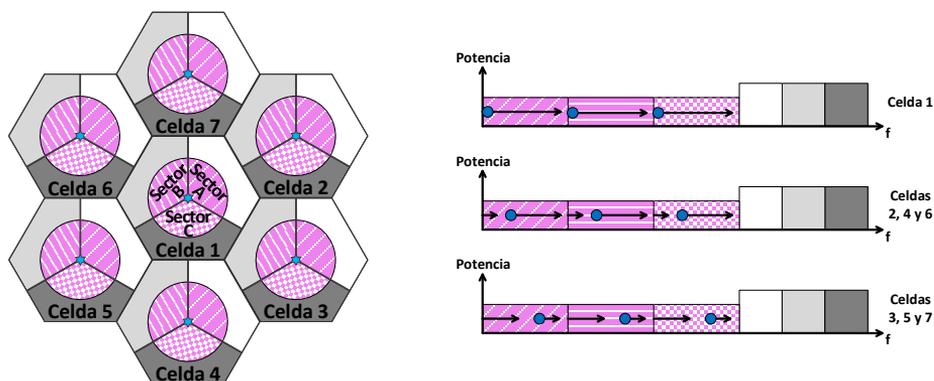


Figura 6.1: Asignación de recursos del esquema FFRopa

Sin pérdida de generalidad, se asume como en capítulos anteriores que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos entre la celda y el UE en el enlace descendente. En las siguientes tablas se resume la nomenclatura empleada a lo largo de la descripción de las estrategias de control de admisión que se presentan en los siguientes apartados de este capítulo.

S	Conjunto de sectores pertenecientes a una celda
U_c	Conjunto de usuarios conectados a una celda
U_s	Conjunto de usuarios conectados al sector s
$U_{int,s}^{z=0}$	Conjunto de usuarios interiores conectados al sector s , que pertenecen a la zona 0
$U_{int,s}^{z=1}$	Conjunto de usuarios interiores conectados al sector s , que pertenecen a la zona 1
$U_{ext,s}^{z=2}$	Conjunto de usuarios exteriores conectados al sector s , que pertenecen a la zona 2
$N_{total,int,c}$	Número total de RBs de la subbanda interior de la celda
$N_{total,ext,c}$	Número total de RBs de la subbanda exterior de la celda
$N_{total,ext,s}$	Número total de RBs de la subbanda exterior del sector s
$\eta_{off,RBint}^z$	Eficiencia por RB obtenida offline para los RBs de la subbanda interior y para los usuarios de la zona z
$\eta_{off,RBext}^z$	Eficiencia por RB obtenida offline para los RBs de la subbanda exterior y para los usuarios de la zona z

Tabla 6.1: Parámetros generales

T_{req}^u	Tasa requerida del servicio cursado por el usuario u
$NRBint_{req}^u$	Estimación del número de RBs de la subbanda interior requeridos para satisfacer los requisitos del usuario u
$NRBext_{req}^u$	Estimación del número de RBs de la subbanda exterior requeridos para satisfacer los requisitos del usuario u
$NRBint_{cons}^u(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda interior consumidos por el usuario u , obtenida en la subtrama t
$NRBext_{cons}^u(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda exterior consumidos por el usuario u , obtenida en la subtrama t

Tabla 6.2: Parámetros relacionados con la estimación de RBs a nivel de usuario

$NRBint_{cons,s}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda interior consumidos por los usuarios conectados al sector s , obtenida en la subtrama t
$NRBext_{cons,s}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda exterior consumidos por los usuarios conectados al sector s , obtenida en la subtrama t
$NRBint_{cons,s}^{UEint}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda interior consumidos por los usuarios interiores conectados al sector s , obtenida en la subtrama t
$NRBint_{cons,s}^{UEext}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda interior consumidos por los usuarios exteriores conectados al sector s , obtenida en la subtrama t
$NRBext_{cons,s}^{UEint}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda exterior consumidos por los usuarios interiores conectados al sector s , obtenida en la subtrama t
$NRBext_{cons,s}^{UEext}(t)$	Estimación del número de RBs de la subbanda exterior consumidos por los usuarios exteriores conectados al sector s , obtenida en la subtrama t

Tabla 6.3: Parámetros relacionados con la estimación de RBs a nivel de sector

Los parámetros $N_{total,int,c}$, $N_{total,ext,c}$ y $N_{total,ext,s}$ (Tabla 6.1) están relacionados con las restricciones impuestas por el esquema de ICIC FFRopa. Se considera un ancho de banda del sistema de 5 MHz, con lo que se dispone de un total de 27 RBs. De ellos, se consideran 18 RBs como subbanda interior ($N_{total,int,c}$), de los cuales se preasignan a cada sector 6 RBs, aunque cuando un sector ocupa todos los RBs de su subbanda comienza a ocupar los RBs preasignados a los otros sectores de la celda. Los 9 RBs restantes forman la subbanda exterior ($N_{total,ext,c}$), en la que se aplica una sectorización estricta, asignando 3 RBs a cada uno de los sectores ($N_{total,ext,s}$). De forma similar a los capítulos anteriores, en cada celda se

definen tres zonas, y se considera que los UEs que pertenecen a las zonas 0 y 1 son UEs interiores, mientras que los UEs que pertenecen a la zona 2 son considerados UEs exteriores.

6.3 Estimación de la demanda y de los recursos consumidos en la celda

En este apartado se describen las diferentes propuestas que se emplean para estimar la demanda de recursos del servicio cursado por un usuario que intenta acceder a la celda, y para estimar el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados a la celda, que posteriormente se aplican en las estrategias de control de admisión que se presentan en los siguientes apartados. Respecto a la estimación del consumo de los usuarios actualmente conectados a la celda, se han estudiado propuestas basadas en estimaciones teóricas empleando eficiencias obtenidas offline, así como propuestas basadas en medidas reales del consumo de cada usuario.

6.3.1 Estimación de la demanda del servicio

Para estimar la demanda de recursos frecuenciales del servicio cursado por un nuevo usuario que intenta acceder a la celda, que puede tratarse de un usuario que acaba de encender el terminal e intenta acceder al sistema por primera vez, o también de un usuario que proviene de una celda vecina y se intenta realizar el proceso de handover, como el usuario aún no ha tenido acceso a la celda, no se disponen de medidas reales del consumo de recursos. Por lo tanto, se estiman teóricamente los recursos que requiere el usuario para satisfacer los requisitos de QoS de su servicio. Para realizar estas estimaciones teóricas se han obtenido de forma offline las eficiencias por RB alcanzadas por los usuarios pertenecientes a las diferentes zonas de la celda (zonas 0, 1 y 2) y para las dos subbandas de recursos: interior y exterior. Concretamente, se han estimado los bits promedio que son capaces de transmitir en un RB los usuarios de una zona de la celda, empleando los recursos de una de las subbandas. De esta forma, se ha estimado un valor promedio de eficiencia por RB para cada zona de la celda (z) y para cada una de las subbandas de recursos: $\eta_{off,RBint}^z$ y $\eta_{off,RBext}^z$.

Se han considerado dos alternativas para estimar la demanda de recursos del nuevo usuario que intenta acceder a la celda, y la aplicación de cada una de ellas dependerá de la política de control de admisión empleada. La primera alternativa considera que, si un usuario interior (perteneciente a las zonas 0 y 1) intenta acceder a la celda, accederá a los recursos de la subbanda interior, mientras que, si se trata de un usuario exterior (perteneciente a la zona 2), accederá a los recursos de la subbanda exterior. No obstante, el algoritmo de scheduling

empleado para el esquema FFRopa (explicado en el subapartado 2.3.1.1) es más flexible, y permite a los usuarios interiores acceder a los recursos de la subbanda exterior si es necesario, y del mismo modo, también permite a los usuarios exteriores acceder a los recursos de la subbanda interior. Por ello, en la segunda alternativa se considera la subbanda de recursos a la que se cree que accederá el nuevo usuario.

Para estimar el número de RBs de la subbanda interior requeridos para satisfacer los requisitos del usuario u ($NRBint_{req}^u$) se emplea la ecuación (6.12), donde T_{req}^u es la tasa requerida del servicio cursado por el usuario u , y $\eta_{off,RBint}^z$ es la eficiencia por RB obtenida offline para los RBs de la subbanda interior y para los usuarios de la zona z . De forma similar, el número de RBs de la subbanda exterior requeridos para satisfacer los requisitos del usuario u ($NRBext_{req}^u$) se estima mediante la ecuación (6.13), donde $\eta_{off,RBext}^z$ es la eficiencia por RB obtenida offline para los RBs de la subbanda exterior y para los usuarios de la zona z .

$$NRBint_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBint}^z} \quad (6.12)$$

$$NRBext_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBext}^z} \quad (6.13)$$

6.3.2 Estimación teórica ideal del consumo en la celda

En la primera propuesta para estimar el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados a la celda se considera una estimación teórica, empleando las eficiencias por RB obtenidas offline ($\eta_{off,RBint}^z$ y $\eta_{off,RBext}^z$). Se considera que los usuarios interiores solo acceden a los recursos de la subbanda interior, mientras que los usuarios exteriores solo acceden a los recursos de la subbanda exterior. Por lo tanto, para los usuarios que pertenecen a las zonas 0 y 1 se emplea la ecuación (6.12) para estimar su demanda de RBs en la subbanda interior ($NRBint_{req}^u$). Y en el caso de los usuarios que pertenecen a la zona 2 se estima su demanda de RBs en la subbanda exterior ($NRBext_{req}^u$) mediante la ecuación (6.13).

A partir de aquí, la estimación del número de RBs consumidos de la subbanda interior por el sector s en la subtrama t ($NRBint_{cons,s}^{UEint}(t)$) se obtiene sumándose las estimaciones teóricas de los RBs requeridos de todos los usuarios de la zona interior de la celda pertenecientes a dicho sector. Del mismo modo, la estimación del número de RBs consumidos de la subbanda exterior del sector s

en la subtrama t ($NRBext_{cons,s}^{UExt}(t)$) se obtiene sumándose las estimaciones teóricas de los RBs requeridos de todos los usuarios de la zona exterior de la celda pertenecientes al sector s (ecuación (6.14)). $U_{int,s}^{z0}$ y $U_{int,s}^{z1}$ representan el conjunto de usuarios interiores conectados al sector s que pertenecen a la zona 0 y a la zona 1 respectivamente, y $U_{ext,s}^{z2}$ representa el conjunto de usuarios exteriores conectados al sector s que pertenecen a la zona 2. Se trata de una propuesta simple, pero subóptima, ya que el scheduling empleado es más flexible y permite que todos los usuarios puedan acceder a ambas subbandas de recursos. No obstante, es una propuesta que se plantea a efectos comparativos.

$$\begin{aligned}
 NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z0}} NRBint_{req}^u + \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z1}} NRBint_{req}^u \\
 NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{ext,s}^{z2}} NRBext_{req}^u
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

6.3.3 Estimación teórica del consumo considerando la subbanda de recursos a la que accedería cada usuario

En la anterior propuesta se considera que los usuarios interiores solo acceden a los recursos de la subbanda interior y que los usuarios exteriores solo acceden a los recursos de la subbanda exterior. Sin embargo, el algoritmo de scheduling empleado es más flexible y permite a los usuarios interiores acceder a los recursos de la subbanda exterior si es necesario, y del mismo modo también permite a los usuarios exteriores acceder a los recursos de la subbanda interior. Teniendo en cuenta este grado de flexibilidad del algoritmo de scheduling, en esta propuesta los recursos consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda se estiman también de forma teórica, empleando las eficiencias por RB obtenidas offline, pero considerando la subbanda de recursos a la que se cree que accedería cada usuario.

Siguiendo este planteamiento, cada vez que un usuario intenta conectarse a la celda se estima el consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados mediante el procedimiento descrito en pseudo-código en la Tabla 6.4. Se van considerando los usuarios de uno en uno, a la vez que se van actualizando las estimaciones de RBs consumidos en las subbandas interiores y exteriores. Para ello se dispone de un listado con todos los usuarios conectados a la celda, y cada vez que un nuevo usuario se conecta a la celda, se añade al final de la misma. De esta forma, la lista se recorre siempre de principio a fin, tratando de mantener estable la estimación de los RBs consumidos entre procesos de admisión consecutivos. Es una propuesta menos rígida que la anterior, pero sigue siendo subóptima, ya que no se tiene en cuenta los recursos frecuenciales a los que realmente está accediendo cada usuario.

Inicialización: $NRBint'_{cons,s} = 0$ y $NRBext'_{cons,s} = 0 \forall s \in S$

for $u = 0$ to length (U_c)

if ($u \in U_{int,s}^{z0}$) or ($u \in U_{int,s}^{z1}$) **then**

$$NRBint_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBint}^z} \text{ con } z = 0 \text{ o } z = 1$$

if ($\sum_{\forall s \in S} NRBint'_{cons,s} + NRBint_{req}^u \leq N_{total,int,c}$) **then**

$$NRBint'_{cons,s} = NRBint'_{cons,s} + NRBint_{req}^u$$

else

$$NRBext_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBext}^z} \text{ con } z = 0 \text{ o } z = 1$$

$$NRBext'_{cons,s} = NRBext'_{cons,s} + NRBext_{req}^u$$

end if

else ($u \in U_{ext,s}^{z2}$)

$$NRBext_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBext}^z} \text{ con } z = 2$$

if $NRBext'_{cons,s} + NRBext_{req}^u \leq N_{total,ext,s}$ **then**

$$NRBext'_{cons,s} = NRBext'_{cons,s} + NRBext_{req}^u$$

else

$$NRBint_{req}^u = \frac{T_{req}^u}{\eta_{off,RBint}^z} \text{ con } z = 2$$

$$NRBint'_{cons,s} = NRBint'_{cons,s} + NRBint_{req}^u$$

end if

end if

end for

Se define: $NRBint_{cons,s}(t) = NRBint'_{cons,s} \forall s \in S$

$$NRBext_{cons,s}(t) = NRBext'_{cons,s} \forall s \in S$$

Tabla 6.4: Pseudo-código de la estimación teórica del consumo

Tal y como se describe en el pseudo-código, si el usuario a considerar pertenece a la zona interior de la macrocelda, se emplea la eficiencia offline estimada para la subbanda interior de recursos y para los usuarios de la zona z ($z = 0$ o $z = 1$) a la que pertenece el usuario en cuestión ($\eta_{off,RBint}^z$). De esta forma, se estima el número de RBs de la subbanda interior que necesitaría el usuario para satisfacer sus requisitos. Una vez estimados, se comprueba si todavía hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda para poder asignar los RBs que necesita el usuario. Para ello, se van contabilizando los RBs de la subbanda interior consumidos por los usuarios previamente considerados. Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior para asignar los RBs

requeridos por el usuario considerado, se añaden los RBs requeridos por el usuario al consumo de RBs de la subbanda interior, y se pasa a considerar al siguiente usuario de la celda. Si por el contrario no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior para satisfacer los RBs requeridos por el usuario, se estima de nuevo el número de RBs requeridos por el usuario, pero empleando esta vez la eficiencia offline estimada para la subbanda exterior de recursos y para los usuarios de la zona z a la que pertenece el usuario considerado ($\eta_{off,RBext}^z$). A continuación, se añaden los RBs exteriores requeridos por el usuario al consumo de RBs de la subbanda exterior del sector al que pertenece el usuario y se pasa a considerar al siguiente usuario de la celda.

Para el caso en el que el usuario considerado pertenezca a la zona exterior de la celda se sigue un procedimiento análogo. En primer lugar, se estima el número de RBs que requeriría el usuario empleando la eficiencia offline estimada para la subbanda exterior de recursos y para los usuarios de la zona z ($z = 2$) a la que pertenece el usuario considerado ($\eta_{off,RBext}^z$). A continuación, se comprueba si todavía hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior del sector para poder satisfacer los RBs que necesita el usuario. Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior del sector, se añaden los RBs exteriores requeridos por el usuario al consumo de RBs de la subbanda exterior y se pasa a considerar al siguiente usuario de la celda. Si por el contrario no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior para satisfacer los RBs requeridos por el usuario, se estima de nuevo el número de RBs requeridos por el usuario, pero empleando esta vez la eficiencia offline estimada para la subbanda interior de recursos y para los usuarios de la zona z a la que pertenece el usuario considerado ($\eta_{off,RBint}^z$). Finalmente, se añaden los RBs interiores requeridos por el usuario al consumo de RBs de la subbanda interior y se pasa a considerar al siguiente usuario de la celda.

6.3.4 Estimación del consumo basada en medidas

Las dos propuestas previas para estimar el consumo de recursos de los usuarios conectados actualmente a la celda se basan en estimaciones teóricas empleando las eficiencias promedio por RB obtenidas offline. Sin embargo, aunque estas propuestas son ampliamente utilizadas en la literatura, son sencillas, y pueden desviarse del consumo real de recursos al no considerar los recursos frecuenciales a los que realmente está accediendo cada uno de los usuarios. Con el objetivo de tratar de obtener una estimación del consumo que se ajuste más a la realidad, en esta propuesta se estiman los RBs consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda a partir de medidas de consumo almacenadas para cada usuario durante un periodo de observación.

Para cada usuario conectado a la celda se almacenan las medidas de RBs consumidos en cada subtrama. Se emplean dos ventanas deslizantes para almacenar por separado las medidas de RBs consumidos pertenecientes a la subbanda interior, de las medidas de RBs consumidos pertenecientes a la subbanda exterior, tomadas durante las últimas subtramas (periodo de observación). De esta forma, se obtiene un promedio de los RBs interiores y de los RBs exteriores consumidos por cada usuario u ($NRBint_{cons}^u(t)$ y $NRBext_{cons}^u(t)$), basándose en las medidas del consumo real del usuario durante las últimas subtramas. A partir de estas medidas de consumo de los usuarios se obtienen los RBs de la subbanda interior consumidos por el sector s en la subtrama t ($NRBint_{cons,s}(t)$), sumando las estimaciones de los RBs consumidos en la subbanda interior de todos los usuarios pertenecientes al sector, ya sean interiores ($NRBint_{cons,s}^{UEint}(t)$) o exteriores ($NRBint_{cons,s}^{UEext}(t)$), tal y como se expresa en la ecuación (6.15).

$$\begin{aligned}
 NRBint_{cons,s}(t) &= NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) + NRBint_{cons,s}^{UEext}(t) \\
 NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z=0}} NRBint_{cons}^u(t) + \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z=1}} NRBint_{cons}^u(t) \quad (6.15) \\
 NRBint_{cons,s}^{UEext}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{ext,s}^{z=2}} NRBint_{cons}^u(t)
 \end{aligned}$$

Aplicando el mismo planteamiento, para obtener el consumo de RBs en la subbanda exterior del sector s en la subtrama t ($NRBext_{cons,s}(t)$), se suman las estimaciones de los RBs consumidos en la subbanda exterior de todos los usuarios pertenecientes al sector, ya sean interiores ($NRBext_{cons,s}^{UEint}(t)$) o exteriores ($NRBext_{cons,s}^{UEext}(t)$), tal y como se refleja en la ecuación (6.16). En esta propuesta, el aspecto a parametrizar es el tamaño de las ventanas deslizantes empleadas para obtener los promedios de RBs consumidos por los UEs en las últimas subtramas. Ya que, un tamaño de ventana grande permite obtener unas estimaciones más estables, pero a costa de reaccionar de forma más lenta ante cambios en el consumo de RBs de los usuarios, que pueden ser provocados por la movilidad de los propios usuarios, o por cambios en las condiciones de canal, etc.

$$\begin{aligned}
 NRBext_{cons,s}(t) &= NRBext_{cons,s}^{UEint}(t) + NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) \\
 NRBext_{cons,s}^{UEint}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z=0}} NRBext_{cons}^u(t) + \sum_{\forall u \in U_{int,s}^{z=1}} NRBext_{cons}^u(t) \quad (6.16) \\
 NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{ext,s}^{z=2}} NRBext_{cons}^u(t)
 \end{aligned}$$

6.3.5 Estimación del consumo ponderando las medidas con un factor corrector

Cuando la celda no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS del tráfico cursado por un usuario, las medidas de los recursos consumidos por el usuario en las últimas subtramas no representan fielmente los recursos que necesita el usuario para satisfacer sus requisitos. Hay que tener en cuenta que, en esta situación, la estimación del consumo promedio de RBs del usuario basada en sus propias medidas, dará como resultado un consumo de RBs inferior al realmente requerido, ya que los recursos que está recibiendo el usuario no son suficientes para satisfacer sus requisitos. Por lo tanto, es necesario considerar el consumo adicional de recursos que necesitaría el usuario, para que la celda sea capaz de satisfacer los requisitos de QoS del servicio cursado. Con este objetivo, se propone que las estimaciones de los RBs consumidos por cada usuario sean ponderadas con un factor corrector ($F_{correc}^u(t)$), que considera el grado de satisfacción de los requisitos de QoS que está observando cada usuario u en una subtrama determinada t .

Para obtener los recursos de la subbanda interior consumidos por el sector s en la subtrama t ($NRBint_{cons,s}(t)$) se emplea la ecuación (6.17), en la que se suman las estimaciones ponderadas de los RBs consumidos en la subbanda interior de todos los usuarios pertenecientes al sector, ya sean interiores ($NRBint_{cons,s}^{UEint}(t)$) o exteriores ($NRBint_{cons,s}^{UEext}(t)$).

$$\begin{aligned}
 NRBint_{cons,s}(t) &= NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) + NRBint_{cons,s}^{UEext}(t) \\
 NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{int,s}^0} F_{correc}^u(t) \cdot NRBint_{cons}^u(t) + \\
 &+ \sum_{\forall u \in U_{int,s}^1} F_{correc}^u(t) \cdot NRBint_{cons}^u(t) \\
 NRBint_{cons,s}^{UEext}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{ext,s}^2} F_{correc}^u(t) \cdot NRBint_{cons}^u(t)
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

Aplicando el mismo planteamiento, se emplea la ecuación (6.18) para obtener el consumo de RBs en la subbanda exterior del sector s en la subtrama t ($NRBext_{cons,s}(t)$), sumando las estimaciones ponderadas de los RBs consumidos en la subbanda exterior de todos los usuarios pertenecientes al sector, ya sean interiores ($NRBext_{cons,s}^{UEint}(t)$) o exteriores ($NRBext_{cons,s}^{UEext}(t)$).

$$\begin{aligned}
 NRBext_{cons,s}(t) &= NRBext_{cons,s}^{UEint}(t) + NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) \\
 NRBext_{cons,s}^{UEint}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{int,s}^z0} F_{correc}^u(t) \cdot NRBext_{cons}^u(t) + \\
 &+ \sum_{\forall u \in U_{int,s}^z1} F_{correc}^u(t) \cdot NRBext_{cons}^u(t) \\
 NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) &= \sum_{\forall u \in U_{ext,s}^z2} F_{correc}^u(t) \cdot NRBext_{cons}^u(t)
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

6.4 Estrategias de CAC con partición completa de recursos

En este apartado se presentan estrategias de CAC basadas en una partición completa de los recursos frecuenciales (CP). Como se ha visto en el estado del arte, la idea principal de la estrategia CP es dividir el ancho de banda disponible en el sistema en diferentes subbandas, y cada subbanda se reserva para UEs de un determinado grupo. Como se emplea el esquema FFRopa como esquema de ICIC se ha agrupado a los UEs como interiores y exteriores, y se considera que los usuarios solo acceden a los recursos frecuenciales destinados a la zona de la celda a la que pertenecen. Es decir, se considera que los usuarios de la zona interior de la celda solo acceden a los recursos de la subbanda interior, y de forma análoga, se considera que los usuarios exteriores solo acceden a la subbanda exterior. Este tipo de estrategias de partición completa son bastante rígidas, y no tienen en cuenta la flexibilidad proporcionada por el algoritmo de scheduling considerado. No obstante, se consideran como punto de partida y servirán para comparar las prestaciones del resto de estrategias de CAC que se presentan en este capítulo.

Tal y como se ha visto, se consideran diferentes alternativas para estimar el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados a la celda, las cuales se pueden agrupar en dos grandes bloques. Por un lado, las que se basan en estimar de forma teórica el consumo de RBs, empleando las eficiencias promedio por RB obtenidas offline. Y, por otro lado, las alternativas que se basan en medidas del consumo real de cada usuario. A continuación, se presentan dos implementaciones de una estrategia de CAC de partición completa, en función de si la estimación de los recursos consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda se basa en estimaciones teóricas o en las medidas del consumo real.

6.4.1 Estrategia con partición completa de recursos, basada en una estimación teórica de los recursos consumidos (CP_teo)

En la estrategia CP_teo la estimación del consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados a la celda se obtiene teóricamente empleando las eficiencias por RB obtenidas offline. Como en las estrategias de CP se considera que los usuarios solo acceden a los recursos frecuenciales destinados a la zona de la celda a la que pertenecen, se emplea la propuesta explicada en el subapartado 6.3.2. Por lo tanto, la estimación del número de RBs consumidos de la subbanda interior por cada sector s se obtiene sumándose las estimaciones teóricas de los RBs requeridos de todos los usuarios interiores que pertenecen al sector s ($NRBint_{cons,s}^{UEint}(t)$). De forma análoga, la estimación del número de RBs consumidos de la subbanda exterior por cada sector s se obtiene sumándose las estimaciones teóricas de los RBs requeridos de todos los usuarios exteriores que pertenecen al sector s ($NRBext_{cons,s}^{UEext}(t)$).

Para estimar la demanda de RBs del nuevo usuario que quiere conectarse a la celda también se emplean las eficiencias por RB obtenidas offline (subapartado 6.3.1). Además, como se trata de una estrategia de CP, si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona interior, se estiman los RBs de la subbanda interior que requiere el usuario para satisfacer sus requisitos de QoS ($NRBint_{req}^u$) empleando la ecuación (6.12). Por el contrario, si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona exterior, se estiman los RBs de la subbanda exterior que requiere el usuario para satisfacer sus requisitos de QoS ($NRBext_{req}^u$) empleando la ecuación (6.13).

La política empleada en la estrategia CP_teo para la admisión de los usuarios que intentan acceder a la celda se presenta en la ecuación (6.19). Si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona interior, dicho usuario solo será aceptado si existen suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda ($N_{total,int,c}$) para satisfacer su demanda de recursos. Por el contrario, si el usuario que intenta acceder pertenece a la zona exterior, el usuario solo será aceptado si existen suficientes RBs disponibles para satisfacer su demanda de recursos en la subbanda exterior del sector al que intenta acceder ($N_{total,ext,s}$).

o Si es un usuario interior, solo se acepta si:

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}^{UEint}(t) + NRBint_{req}^u \leq N_{total,int,c} \quad (6.19)$$

o Si es un usuario exterior, solo se acepta si:

$$NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) + NRBext_{req}^u \leq N_{total,ext,s}$$

En la revisión del estado del arte se ha visto que algunas propuestas consideran reservar un margen de recursos frecuenciales para los UEs que realizan un handover desde una celda vecina. Sin embargo, esto conlleva el incremento de la probabilidad de bloqueo de nuevos UEs que tratan de acceder a la red. Por lo tanto, en esta tesis se ha optado por no reservar recursos frecuenciales para los UEs que realizan handover entre celdas, con el objetivo de ofrecer una menor probabilidad de bloqueo a nuevas conexiones. De forma similar, en algunas propuestas se considera reservar un margen de recursos para aquellas situaciones en las que algunos UEs ya admitidos, por motivos de movilidad, o de cambios en sus condiciones de canal, necesiten una mayor cantidad de RBs que la presupuestada en su admisión. No obstante, esta estrategia también conlleva un incremento en la probabilidad de bloqueo. Por lo tanto, en línea con lo anterior, en las estrategias propuestas en esta tesis se ha optado por no reservar RBs, y si se da esta situación, se asume que los UEs ya admitidos no son rechazados hasta que se finalice su conexión y se asume que puede darse una pequeña degradación en la satisfacción de los requisitos de QoS de todos los UEs de la celda.

6.4.2 Estrategia con partición completa de recursos, basada en medidas reales del consumo de recursos (CP_med)

En la estrategia previa CP_teo, el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados se estima de forma teórica empleando las eficiencias por RB obtenidas offline. Es una alternativa sencilla para estimar el consumo de los usuarios, sin embargo, con el objetivo de intentar estimar el consumo de RBs de una forma más realista, en la estrategia CP_med se emplean medidas de consumo almacenadas para cada usuario durante un periodo de observación. Se emplea la propuesta descrita en el subapartado 6.3.4, estimándose el número de RBs consumidos de la subbanda interior por cada sector s ($NRBint_{cons,s}(t)$) mediante la suma de las estimaciones de los RBs consumidos en la subbanda interior de todos los usuarios pertenecientes al sector. De igual forma, el número de RBs consumidos de la subbanda exterior por cada sector s ($NRBext_{cons,s}(t)$) se obtiene sumando las estimaciones de los RBs consumidos en la subbanda exterior de todos los usuarios pertenecientes al sector.

Para estimar la demanda de RBs del nuevo usuario que quiere conectarse a la celda se emplea el mismo planteamiento que en la estrategia previa CP_teo. Por lo tanto, si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona interior, se estiman los RBs de la subbanda interior que requiere el usuario para satisfacer sus requisitos de QoS ($NRBint_{req}^u$). Mientras que, si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona exterior, se estiman los RBs de la subbanda exterior que requiere el usuario para satisfacer sus requisitos de QoS ($NRBext_{req}^u$).

La política empleada en la estrategia CP_med para la admisión de los usuarios que intentan acceder a la celda se presenta en la ecuación (6.20). Del mismo modo que en la estrategia CP_teo, un usuario interior será admitido si existen suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda ($N_{total,int,c}$) para satisfacer su demanda de recursos. Mientras que un usuario exterior será admitido si existen suficientes RBs disponibles para satisfacer su demanda de recursos en la subbanda exterior del sector al que intenta acceder ($N_{total,ext,s}$).

o Si es un usuario interior, solo se acepta si:

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}(t) + NRBint_{req}^u \leq N_{total,int,c} \quad (6.20)$$

o Si es un usuario exterior, solo se acepta si:

$$NRBext_{cons,s}(t) + NRBext_{req}^u \leq N_{total,ext,s}$$

6.5 Estrategias de CAC con reparto completo de recursos

Las dos estrategias de CAC previas se basan en una partición completa de los recursos frecuenciales, considerando que los usuarios solo acceden a los recursos frecuenciales destinados a la zona de la celda a la que pertenecen. Este tipo de estrategias de partición completa son bastante rígidas, así que, con el objetivo de tener en cuenta las características del esquema de asignación de recursos empleado y con el objetivo de aprovechar su flexibilidad en la asignación de recursos interiores y exteriores, las propuestas de CAC que se describen en este apartado se basan en un reparto completo de los recursos (CS). Como se ha visto en la revisión del estado del arte, la idea principal de la estrategia CS es que se permite acceder a todos los UEs a todo el ancho de banda disponible. Por lo tanto, en las estrategias que se presentan se considera que un usuario, ya sea interior o exterior, puede acceder a los recursos frecuenciales de ambas subbandas.

De cara a estimar la demanda de recursos del nuevo usuario que quiere acceder a la celda, en lugar de considerar directamente la zona a la que pertenece al usuario, en las estrategias de CS se emplea la alternativa que considera la subbanda de recursos a la que se cree que accederá el nuevo usuario (subapartado 6.3.1). Se proponen dos implementaciones de una estrategia de CAC de reparto completo, en función de si la estimación de los recursos consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda se basa en estimaciones teóricas (CS_teo) o en las medidas del consumo real (CS_med).

En la estrategia CS_teo, el consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados a la celda se estima de forma teórica considerando la subbanda de recursos a la que accedería cada usuario, mediante la propuesta explicada en el subapartado 6.3.3. Por lo tanto, cada vez que un usuario intenta conectarse a la celda, se vuelven a considerar los usuarios actualmente conectados de uno en uno, y se van actualizando las estimaciones de RBs consumidos, obteniéndose el número de RBs consumidos por cada sector en ambas subbandas: $NRBint_{cons,s}(t)$ y $NRBext_{cons,s}(t)$.

Si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona interior, en primer lugar se estima su demanda de RBs en la subbanda interior ($NRBint_{req}^u$) empleando la eficiencia offline estimada para la subbanda interior de recursos, y para los usuarios de la zona z a la que pertenece el usuario que intenta acceder, tal y como se define en la ecuación (6.12). A continuación se comprueba si existen suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda ($N_{total,int,c}$) para satisfacer la demanda de recursos del usuario que intenta acceder a la celda (6.21).

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}(t) + NRBint_{req}^u \leq N_{total,int,c} \quad (6.21)$$

Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda, en la política de admisión se empleará la estimación de la demanda de recursos en la subbanda interior ($NRB_{req}^u = NRBint_{req}^u$). Si por el contrario no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior, se estima la demanda de RBs del usuario en la subbanda exterior ($NRBext_{req}^u$) empleando la eficiencia offline estimada para la subbanda exterior de recursos, y para los usuarios de la zona z a la que pertenece el usuario, mediante la ecuación (6.13). En este caso, en la política de admisión se empleará la estimación de la demanda de recursos en la subbanda exterior ($NRB_{req}^u = NRBext_{req}^u$).

Para los casos en los que el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona exterior se sigue un procedimiento análogo. En primer lugar, se estima el número de RBs que requeriría el usuario en la subbanda exterior ($NRBext_{req}^u$) mediante la ecuación (6.13). A continuación, se comprueba si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior del sector al que intenta acceder el usuario ($N_{total,ext,s}$) para poder satisfacer su demanda de RBs, mediante la ecuación (6.22).

$$NRBext_{cons,s}(t) + NRBext_{req}^u \leq N_{total,ext,s} \quad (6.22)$$

Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior del sector, en la política de admisión se empleará la estimación de RBs requeridos en la

subbanda exterior ($NRB_{req}^u = NRB_{ext_{req}}^u$). Si por el contrario no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior para satisfacer los RBs requeridos del usuario, se estima la demanda de RBs del usuario en la subbanda interior ($NRB_{int_{req}}^u$) mediante la ecuación (6.12). En este caso, en la política de admisión se empleará la estimación de la demanda de recursos en la subbanda interior ($NRB_{req}^u = NRB_{int_{req}}^u$).

En la estrategia CS_med, el consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados a la celda se estima empleando las medidas de consumo almacenadas para cada usuario, aplicando la propuesta explicada en el subapartado 6.3.4. En cuanto a la estimación de la demanda de RBs del usuario que quiere conectarse a la celda, se emplea un procedimiento muy similar al explicado para la estrategia CS_teo, pero considerando unos matices relativos a las estimaciones de consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados. Si el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona interior, se estima su demanda de RBs en la subbanda interior ($NRB_{int_{req}}^u$), y se comprueba si existen suficientes RBs disponibles en la subbanda interior de la celda ($N_{total,int,c}$). En este caso, para comprobar si existen suficientes recursos en la subbanda interior, solo se tienen en cuenta los RBs de la subbanda interior consumidos por los usuarios interiores ($NRB_{cons,s}^{UEint}(t)$), obtenidos mediante la ecuación (6.15). Ya que, aunque haya usuarios exteriores que estén consumiendo recursos de la subbanda interior, el usuario que accedería a la celda podría recibir esos recursos de la subbanda interior, desplazando a los usuarios exteriores a recibir asignaciones en los recursos de la subbanda exterior. Por lo tanto, se emplea la ecuación (6.23) para comprobar si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior.

$$\sum_{\forall s \in S} NRB_{cons,s}^{UEint}(t) + NRB_{int_{req}}^u \leq N_{total,int,c} \quad (6.23)$$

Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior, en la política de admisión se empleará la estimación de la demanda de recursos en la subbanda interior ($NRB_{req}^u = NRB_{int_{req}}^u$). Por el contrario, si no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda interior, se estima la demanda de RBs en la subbanda exterior, empleándose esta estimación en la política de admisión ($NRB_{req}^u = NRB_{ext_{req}}^u$). Para el caso en el que el usuario que intenta acceder a la celda pertenece a la zona exterior, se estima su demanda de RBs en la subbanda exterior ($NRB_{ext_{req}}^u$), y se comprueba si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior del sector ($N_{total,ext,s}$). De la misma forma que en el caso de un usuario interior que intenta acceder a la celda, para comprobar si existen suficientes recursos en la subbanda exterior del sector solo se tienen en cuenta los RBs de la subbanda exterior consumidos por usuarios exteriores ($NRB_{cons,s}^{UEext}(t)$), que se obtienen mediante la ecuación (6.16). Se considera que,

aunque haya usuarios interiores que estén consumiendo recursos de la subbanda exterior, el usuario que accedería a la celda podría recibir esos recursos de la subbanda exterior, desplazando a los usuarios interiores a recibir asignaciones en los recursos de la subbanda interior. Se emplea la ecuación (6.24) para comprobar si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior.

$$NRBext_{cons,s}^{UEext}(t) + NRBext_{req}^u \leq N_{total,ext,s} \quad (6.24)$$

Si hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior, en la política de admisión se empleará la estimación de RBs requeridos en la subbanda exterior ($NRB_{req}^u = NRBext_{req}^u$). Si por el contrario no hay suficientes RBs disponibles en la subbanda exterior, se estima la demanda de RBs en la subbanda interior, empleándose esta estimación en la política de admisión ($NRB_{req}^u = NRBint_{req}^u$).

Finalmente, la política empleada en ambas estrategias (CS_teo y CS_med) para la admisión de los usuarios que intentan acceder a la celda se presenta en la ecuación (6.25). Como en las estrategias de CS se considera que un usuario puede acceder a los recursos de ambas subbandas, un usuario que intenta acceder a la celda es aceptado si existen suficientes RBs libres para satisfacer sus requisitos en la subbanda interior de la celda y en la subbanda exterior del sector de forma conjunta. Merece la pena destacar que, a diferencia de las estrategias de CP, en las estrategias de CS se aplica la misma política tanto a los usuarios interiores como a los usuarios exteriores.

o El usuario, tanto interior como exterior, solo se acepta si:

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}(t) + NRBext_{cons,s}(t) + NRB_{req}^u \leq N_{total,int,c} + N_{total,ext,s} \quad (6.25)$$

6.6 Resultados de las estrategias de CAC preliminares

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para evaluar las prestaciones obtenidas por las estrategias de CAC preliminares propuestas. Las simulaciones que se presentan tienen como objetivo evaluar la capacidad de las estrategias de CAC para estimar los recursos frecuenciales disponibles, y para decidir si una conexión debe ser aceptada o rechazada. El objetivo final de las estrategias de CAC es que se garantice la satisfacción de los requisitos de QoS de todos los usuarios que son admitidos en el sistema. Por lo tanto, en los resultados se evalúa el porcentaje de conexiones que son rechazadas por las diferentes estrategias, así como la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios admitidos.

6.6.1 Condiciones de evaluación

En líneas generales, las condiciones de evaluación empleadas en este capítulo son las mismas que las que se han empleado en los capítulos anteriores, pero considerando algunos aspectos importantes relacionados fundamentalmente con la generación de conexiones, ya que el objetivo es evaluar las prestaciones de las estrategias de CAC propuestas de forma apropiada. En el apartado 3.4 se explican en detalle las condiciones de evaluación empleadas en esta tesis, y en la Tabla 6.5 se recogen los parámetros de simulación aplicados en este capítulo, que de la misma forma que en los capítulos anteriores han sido seleccionados de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para el desarrollo de LTE [32], considerando la estructura de trama FDD. El sistema celular considerado para este capítulo se compone de 19 macroceldas trisectorizadas, aplicando la técnica wrap-around para evitar los efectos en los bordes del sistema.

En los capítulos anteriores, en cada celda se definían tres zonas con la misma área, y el objetivo principal de esta definición era poder analizar de forma independiente las prestaciones ofrecidas a los usuarios de las diferentes regiones de la celda. Sin embargo, en este capítulo resulta particularmente interesante agrupar a los usuarios que observan prestaciones similares en la misma zona de la forma más realista posible, ya que cuando el consumo y demanda de recursos frecuenciales se estima de forma teórica, se emplea la eficiencia obtenida offline para la zona a la que pertenece el usuario ($\eta_{off,RBint}^z$ y $\eta_{off,RBext}^z$). Por lo tanto, en este capítulo se emplea la diferencia entre la RSRP que observa el UE u de la celda que le da servicio ($RSRP_u^{serv}$) y la RSRP que observa de la principal celda interferente ($RSRP_u^{interf}$) para definir la zona a la que pertenece cada usuario u . Esta diferencia $\Delta_{RSRP,u}^{zonas}$ se calcula mediante la ecuación (6.26), y se definen dos umbrales, TH_{int}^{zonas} y TH_{ext}^{zonas} . De esta forma, si $\Delta_{RSRP,u}^{zonas}$ es superior a TH_{int}^{zonas} , el usuario se clasifica en la zona 0, si $\Delta_{RSRP,u}^{zonas}$ se encuentra entre ambos umbrales TH_{int}^{zonas} y TH_{ext}^{zonas} , el usuario se clasifica en la zona 1, y si $\Delta_{RSRP,u}^{zonas}$ es inferior a TH_{ext}^{zonas} , el usuario se clasifica en la zona 2. Los umbrales, TH_{int}^{zonas} y TH_{ext}^{zonas} , se han definido para que el número promedio de usuarios clasificados en cada zona sea similar cuando los usuarios se distribuyen de forma uniforme a lo largo del área de cobertura de las celdas.

$$\left(\Delta_{RSRP,u}^{zonas}\right)_{dB} = \left(RSRP_u^{serv}\right)_{dBm} - \left(RSRP_u^{interf}\right)_{dBm} \quad (6.26)$$

Parámetro	Valor
Despliegue	19 celdas trisectorizadas ($NBS = 19$)
Distancia entre estaciones base (ISD)	1732 m
Frecuencia central	2.5 GHz
Ancho de banda del sistema (BW)	5 MHz
Periodo de scheduling (TTI)	1 ms
Símbolos OFDM por TTI	14 (4 de ellos para control y pilotos)
Número de RBs	27
Tamaño del RB	12 subportadoras durante 1 TTI
Modelo de propagación	NLOS: $131.1 + 42.8 \log_{10}(d[\text{km}])$
Desviación estándar del shadowing (σ)	8 dB
Correlación en el shadowing entre celdas	0.5
Distancia de correlación del shadowing	50 m
Modelo multicamino	Pedestrian-A extendido (3km/h)
Modelo Doppler	Jakes
Densidad espectral de ruido	-174 dBm/Hz
Potencia máxima de transmisión (eNB)	43 dBm
Ganancia de antena (eNB)	14 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (eNB)	70° (-3 dB) con 25 dB de relación delante-atrás
Ganancia de antena (UE)	0 dB
Patrón de radiación horizontal de la antena (UE)	Omnidireccional
Ganancia de diversidad en transmisión	3 dB
Ganancia de diversidad en recepción	3 dB
Figura de ruido del receptor (UE)	9 dB

Tabla 6.5: Parámetros generales de simulación

Se considera un ancho de banda de 5 MHz para todo el sistema, por lo que se dispone de 27 RBs. Dentro de un mismo RB se asigna la misma potencia de transmisión y el mismo MCS a todas sus subportadoras. Se aplica el mismo modelado de nivel físico y de enlace descrito en el subapartado 3.4.1, modelando de forma explícita la interferencia. Se consideran los mismos MCSs, por lo que en la Tabla 3.1 pueden verse los valores de SINR requeridos, así como la tasa de datos útiles por RB para cada MCS. También se considera el mismo modelado del canal radio detallado en el subapartado 3.4.2, y en la Tabla 6.5 se recogen los valores relacionados con este modelado. Respecto al mecanismo de CQI, se aplica el mismo que el considerado en el subapartado 3.4.3, y en la Tabla 3.4 se

recogen los valores concretos que se han considerado en relación a este mecanismo de CQI. Por lo tanto, se modelan explícitamente tanto los errores en la estimación del canal, como los errores en la estimación de la interferencia.

La generación de nuevas conexiones en cada celda del sistema se modela mediante un proceso de Poisson. De esta forma, el tiempo entre la generación de dos conexiones consecutivas sigue una distribución exponencial, con una tasa de generación de nuevas conexiones $\lambda_{n,c}$. Respecto al modelado de estas conexiones, se aplica el mismo modelo que en los capítulos anteriores y que se describe en el subapartado 3.4.4. Por lo tanto, se asume que cada usuario dispone de una única conexión para la transmisión de datos entre la celda y el UE en el enlace descendente. Por lo tanto, la generación de una nueva conexión conlleva la generación de un nuevo usuario en el sistema. Los nuevos usuarios que intentan acceder al sistema se distribuyen de forma uniforme a lo largo del área de cobertura de cada celda. El tiempo que un usuario permanece activo en el sistema se modela mediante una distribución exponencial, de media μ_{activo}^{UE} . Una vez transcurrido este tiempo, el usuario se desconecta del sistema.

Los usuarios se desplazan a una velocidad de 3 km/h siguiendo el mismo patrón de movimiento que el aplicado en los capítulos anteriores (subapartado 3.4.8). Sin embargo, a diferencia de los capítulos anteriores, como en este capítulo se proponen estrategias de CAC, los usuarios pueden moverse libremente por todo el sistema, realizando cambios de sector dentro de la misma celda y realizando handovers a celdas adyacentes. Se ha considerado un valor de $\mu_{activo}^{UE} = 90$ s, para que los usuarios tengan tiempo de desplazarse por la celda y para que una parte de los usuarios realicen handovers a celdas vecinas.

El criterio de selección de nodo se basa en la RSRP, de tal forma que un usuario es servido por la celda de la que recibe un mayor nivel de RSRP. El procedimiento de handover se ha modelado de forma simplificada ya que no es objeto de investigación en esta tesis. Se ha añadido una histéresis (H_{HO}) de 3 dB para garantizar que el nivel de RSRP de la celda objetivo supera el nivel de RSRP de la celda que actualmente sirve al usuario en un cierto margen y, así, tratar de evitar el efecto ping-pong. Por lo tanto, un usuario realizará un handover a una celda adyacente cuando se satisfaga la condición representada en la ecuación (6.27).

$$\left(RSRP_{eNB,obj}\right)_{dB} > \left(RSRP_{eNB,serv}\right)_{dB} + \left(H_{HO}\right)_{dB} \quad (6.27)$$

Para evaluar las prestaciones de las estrategias de CAC que se proponen en este capítulo se han considerado dos modelos de tráfico distintos: un modelo de tráfico ON-FF y un modelo de tráfico de transmisión de video en tiempo real. No obstante, como en este apartado se evalúan las estrategias de CAC

consideradas como punto de partida, solo se ha considerado el modelo de tráfico a ráfagas ON-OFF. Este modelo de tráfico está explicado en detalle en el subapartado 3.4.4, y se trata de un modelo con restricciones de retardo. Por lo tanto, cuando un paquete de datos lleva almacenado en los buffers de la conexión D_{max}^u subtramas, dicho paquete es descartado. Los valores concretos empleados para el modelo de tráfico ON-OFF se recogen en la Tabla 6.6.

Parámetro	Valor
T_{ON}	30 ms
T_{OFF}	90 ms
α	1/4
L	240 bits
D_{max}^u	50 ms

Tabla 6.6: Parámetros del modelo de tráfico ON-OFF

Para definir los valores de la máscara de potencia empleada en los eNBs se ha seguido el mismo procedimiento que el explicado en el subapartado 3.4.5. En la Tabla 6.7 se recopilan los valores de la máscara de potencia empleada para el esquema de ICIC FFRopa. El incremento de potencia considerado para la subbanda exterior (Δ_{ext}) es de 5 dB. Y para calcular los valores de las máscaras mínima y máxima se ha considerado $\Delta_{min} = 3$ dB y $\Delta_{max} = 3$ dB.

eNBs (FFRopa) [dBm/RB]				
Subbanda	NRB	M_{med}	M_{min}	M_{max}
Interior	18	26.33	23.33	29.33
Exterior	9	31.33	28.33	34.33

Tabla 6.7: Máscaras de potencia

Como en los capítulos anteriores, las entidades asociadas con la gestión de recursos radio, incluyendo la asignación de potencia, la asignación de recursos en tiempo y frecuencia y la selección adaptativa del MCS, están localizadas en los eNBs. Las decisiones de scheduling se toman de forma independiente en cada eNB cada TTI, asumiéndose un periodo de scheduling de 1 ms. En esta tesis la asignación de recursos se trata como un problema multidimensional. Por lo tanto, el esquema de ICIC determina qué recursos frecuenciales pueden ser asignados en cada sector y en cada zona del eNB. Posteriormente es el scheduler el que asigna los recursos frecuenciales a cada UE, aplicándose sus dos componentes de forma secuencial. Como los modelos de tráfico considerados en este capítulo están limitados por el retardo, se considera de nuevo la política de scheduling temporal basada en el retardo acumulado de los paquetes

almacenados en los buffers de las conexiones de los usuarios. La política de scheduling temporal se expresa de nuevo en la ecuación (6.28), donde D_{max}^u es la cota máxima de retardo para el servicio cursado por el usuario y d_{HOL}^u es el retardo acumulado del TU que se encuentra en la cabecera de los buffers de la conexión del usuario. Merece la pena recordar que un TU es la cantidad mínima de datos que puede transmitir el sistema cuando un usuario recibe una asignación de recursos. Es decir, el tamaño del TU se determina como la cantidad de bits que se transmiten en un único RB cuando se emplea el MCS más bajo del sistema.

$$u^* = \arg \max_u \left(\frac{d_{HOL}^u}{D_{max}^u} \right) \quad (6.28)$$

Posteriormente, el scheduler frecuencial es el encargado de seleccionar los RBs que se asignan a cada UE, asignando recursos prioritariamente a aquellos usuarios con mayor índice de prioridad temporal. Como en este capítulo se considera el esquema FFRopa como esquema de ICIC se aplica el algoritmo de scheduling frecuencial descrito en el apartado 2.3.1.1.

Para estimar las eficiencias por RB obtenidas para los usuarios de las diferentes zonas de la celda ($\eta_{off,RBint}^z$ y $\eta_{off,RBext}^z$), se han llevado a cabo simulaciones aplicando las mismas condiciones de evaluación consideradas en este capítulo, pero sin emplear ninguna política de CAC, con el objetivo de evaluar las eficiencias por RB obtenidas para diferentes condiciones de carga. En concreto se ha empleado el modelo de tráfico ON-OFF y se ha ido variando la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$). En la Figura 6.2 se representan las eficiencias obtenidas variando la tasa de generación de nuevas conexiones, y separando los resultados para cada una de las subbandas de recursos frecuenciales. Las eficiencias se expresan en el número de bits promedio que son capaces de recibir los UEs en un RB.

A partir de los resultados de la Figura 6.2 se extraen los valores de eficiencia empleados en las simulaciones de las estrategias de CAC propuestas, que son los que se recogen en la Tabla 6.8. En general, a medida que la carga del sistema aumenta, las eficiencias promedio por RB se reducen en todas las zonas de la celda y para ambas subbandas de recursos, debido a que se empeoran las condiciones de interferencia. No obstante, merece la pena resaltar las eficiencias obtenidas por los usuarios interiores (zonas 0 y 1) en la subbanda exterior, ya que estas aumentan ligeramente cuando se incrementa la carga del sistema. Esto es debido a que, en condiciones de baja carga, solo unos pocos usuarios interiores reciben asignaciones en los RBs exteriores, siendo precisamente los usuarios que peores condiciones de canal observan. Sin embargo, a medida que

la carga del sistema aumenta, un mayor número de UEs interiores reciben asignaciones en la subbanda exterior, obteniéndose eficiencias promedio ligeramente superiores. Como puede verse en la Tabla 6.8, se han seleccionado las eficiencias obtenidas cuando la carga del sistema es elevada, ya que son las más restrictivas y además son las que mejor reflejan la situación en la que la carga de las celdas es elevada, que es cuando el control de admisión cobra relevancia para decidir si se aceptan o rechazan nuevas conexiones.

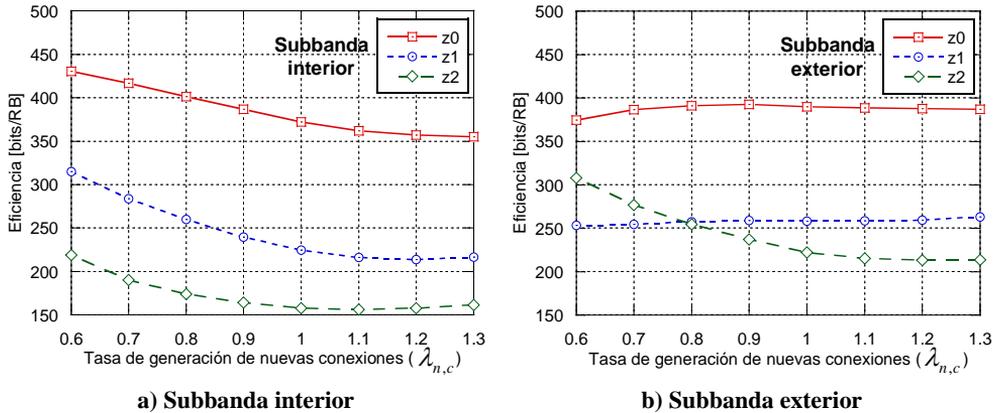


Figura 6.2: Curvas de las eficiencias por RB obtenidas offline

Zona (z)	$\eta_{off,RBint}^z$	$\eta_{off,RBext}^z$
0	355	385
1	215	260
2	155	215

Tabla 6.8: Eficiencias por RB obtenidas offline

Como ya se ha indicado, para almacenar las medidas de los recursos consumidos por cada usuario se emplean ventanas deslizantes, para disponer siempre de las medidas de consumo de las últimas subtramas (periodo de observación). Teniendo en cuenta las características del modelo de tráfico ON-OFF, un ciclo completo de ON-OFF transcurre en promedio cada 120 subtramas ($T_{ON} + T_{OFF}$). Tras realizar simulaciones para varios valores de periodo de observación, se ha definido un periodo de observación de 840 subtramas. Este valor es suficientemente amplio para disponer de medidas del consumo del usuario durante varios periodos completos de ON-OFF, pero sin ser excesivo para reflejar de forma rápida cambios en las condiciones de canal del usuario. El objetivo que se persigue es poder obtener un promedio que represente realmente la cantidad de RBs que está consumiendo el usuario durante el último periodo de subtramas para cursar el modelo de tráfico a ráfagas ON-OFF.

Para obtener el valor del consumo de RBs promedio para cada usuario u y para cada subbanda de recursos en la subtrama t , se emplea la ecuación (6.29). Las medidas almacenadas en la ventana se dividen en dos bloques: un primer bloque con las medidas de las 120 subtramas más recientes y un segundo bloque con las medidas restantes (720 subtramas), que se corresponden a las subtramas más antiguas. Por lo tanto, se obtiene por separado el consumo promedio en las 120 subtramas más recientes (\bar{V}_{rec}^u) y el consumo promedio en las subtramas más antiguas (\bar{V}_{ant}^u). Aplicando un factor β , se da un mayor peso a las medidas de consumo de las muestras más recientes. Concretamente, y tras realizar simulaciones con diferentes valores de β , se ha configurado un valor de $\beta = 0.25$.

$$NRB_{cons}^u(t) = \beta \cdot \bar{V}_{rec}^u + (1 - \beta) \cdot \bar{V}_{ant}^u \quad (6.29)$$

6.6.2 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico ON-OFF con restricciones de retardo

El objetivo final de las estrategias de CAC es que se garantice la satisfacción de los requisitos de QoS de todos los usuarios que son admitidos en el sistema. Por lo tanto, para evaluar las prestaciones de las estrategias de CAC propuestas se han realizado simulaciones variando la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$). En las simulaciones presentadas para el modelo de tráfico ON-OFF $\lambda_{n,c}$ se varía desde 0.8 nuevas conexiones por segundo, que se corresponde con un escenario en el que el CAC debería permitir acceder a la mayoría de las conexiones puesto que las celdas son capaces de satisfacer los requisitos de QoS si se admiten a todas las conexiones, y se va incrementando hasta 1.2 nuevas conexiones por segundo, que se corresponde con un escenario el que el CAC debería rechazar conexiones puesto que las celdas no son capaces de satisfacer los requisitos de QoS si se admiten a todas las conexiones.

Hay que tener en cuenta que la tasa de llegada de conexiones a una celda incluye tanto la tasa de generación de nuevas conexiones como la tasa de llegada de conexiones que realizan handover desde celdas vecinas. No obstante, para facilitar la visualización de los resultados en las figuras que se analizan a continuación solo se representa la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$). Como el modelo de tráfico considerado en este subapartado es un modelo con restricciones de retardo, la evaluación de la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios se realiza en base a la tasa de descarte de TUs. Esta tasa de descarte es el porcentaje de TUs que se descartan por haber excedido el retardo máximo permitido por el servicio cursado por el UE (D_{max}^u), sin haber sido recibidos correctamente. Se ha considerado una cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) del 1%, de tal forma que se considera que se están satisfaciendo los

requisitos de QoS de los usuarios, si el porcentaje de descarte promedio es inferior al 1%.

6.6.2.1 Partición completa de recursos con estimación teórica de los recursos consumidos (CP_teo)

En esta estrategia de partición completa de los recursos frecuenciales se considera que los usuarios interiores acceden a los recursos de la subbanda interior y que los usuarios exteriores acceden a los recursos de la subbanda exterior. Las estimaciones de los recursos consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda, así como la estimación de la demanda de recursos del usuario que intenta acceder a la celda se obtienen teóricamente, empleando las eficiencias por RB obtenidas offline. Se han considerado dos alternativas diferentes para calcular la tasa requerida de los usuarios. En la primera alternativa, se emplea directamente como tasa requerida del usuario la tasa media de generación de tráfico del servicio ON-OFF que está cursando el usuario (T_{req}^{med}). Mientras que en la segunda alternativa se emplea la aproximación Gaussiana, para calcular la tasa requerida equivalente del usuario (T_{req}^{eq}).

En la primera alternativa, para calcular la tasa media de generación de tráfico del servicio ON-OFF se emplea la ecuación (6.30), multiplicando el factor de actividad de la fuente generadora de paquetes (α) por la tasa de pico de la fuente (T_p). Durante el periodo ON se genera un nuevo paquete de longitud L bits en cada subtrama.

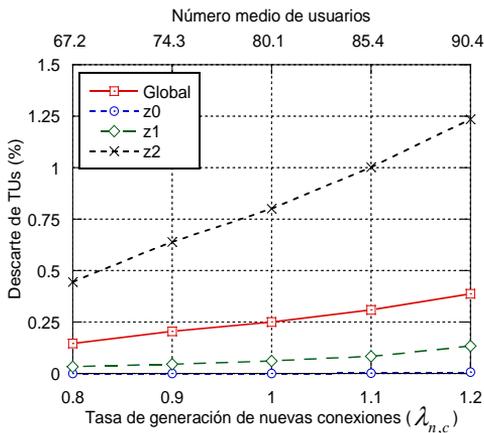
$$T_{req}^{med} = \alpha \cdot T_p = \alpha \cdot \frac{L}{1 TTI} \quad (6.30)$$

En la segunda alternativa, y de forma similar a como se ha visto en el capítulo anterior, para considerar el efecto de multiplexar varios usuarios con un modelo de tráfico ON-OFF, en lugar de emplear directamente la tasa media de generación de tráfico para estimar la tasa requerida (ecuación (6.30)), se aplica la aproximación Gaussiana [64] para calcular la tasa requerida equivalente, tal y como se muestra en la ecuación (6.31). $|U_c|$ permite obtener la cardinalidad del conjunto, de tal forma que equivale al número total de UEs de la celda y ε_{gauss} es la probabilidad de pérdida de paquetes. Asumiendo que se producen pérdidas de paquetes cada vez que se supera la capacidad disponible, se deriva la capacidad equivalente de las fuentes de tráfico ($C_{eq,gauss}$). Esta aproximación ignora la existencia y ocupación de un buffer, por lo que se obtiene una estimación de la tasa requerida de los usuarios (T_{req}^{eq}) bastante conservadora.

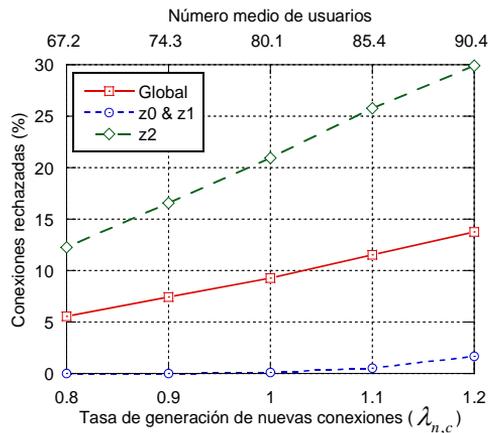
$$\begin{aligned}
 T_{req}^{eq} &= C_{eq,gauss} \\
 &\text{donde} \\
 C_{eq,gauss} &= \frac{T_p \cdot (|U_c| \cdot \alpha + \sigma \cdot K)}{|U_c|} \\
 &\text{con} \\
 \sigma &= \sqrt{|U_c| \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)} \\
 K &= \sqrt{-\ln(2 \cdot \pi) - 2 \cdot \ln(\varepsilon_{gauss})}
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

En la Figura 6.3 se muestran los resultados para la estrategia CP_te, empleando tanto la alternativa que considera directamente la tasa media de generación de tráfico (Figura 6.3(a1) y Figura 6.3(a2)), como la alternativa que considera la tasa equivalente obtenida mediante la aproximación Gaussiana (Figura 6.3(b1) y Figura 6.3(b2)). En la Figura 6.3(a1) y Figura 6.3(b1) se representa la tasa de descarte de TUs, representando el porcentaje de descarte promedio de todos los usuarios (Global), y el porcentaje de descarte promedio agrupando a los usuarios por zonas (zonas 0, 1 y 2). En la Figura 6.3(a2) y Figura 6.3(b2) se representa el porcentaje de conexiones rechazadas, representando el porcentaje global de conexiones rechazadas del sistema, así como el porcentaje de conexiones rechazadas diferenciando si se tratan de conexiones pertenecientes a la zona interior de la celda (zonas 0 y 1) o a la zona exterior de la celda (zona 2). El porcentaje de conexiones rechazadas representado considera, tanto las conexiones nuevas que intentan acceder al sistema por primera vez, como las conexiones que intentan realizar un handover a una celda vecina.

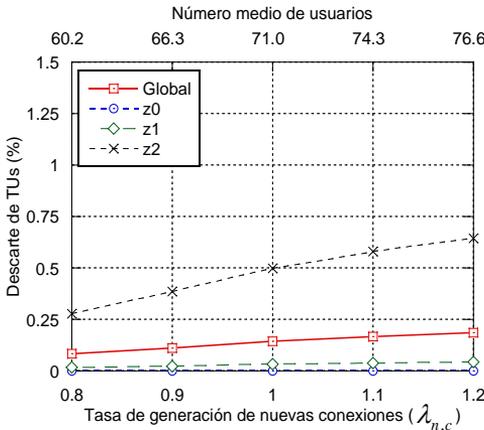
Como se ha comentado, para facilitar la visualización de los resultados en las figuras solo se representa la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$), empleando un doble eje x, donde el eje x inferior representa la tasa de generación de nuevas conexiones, y el eje x superior representa el número promedio de usuarios conectados a cada celda. Este número promedio de usuarios conectados a cada celda se obtiene monitorizando los usuarios realmente conectados en todas las celdas del sistema para cada subtrama de la simulación. Este promedio permite observar los usuarios que finalmente permanecen conectados en el sistema, una vez aplicadas las diferentes estrategias de CAC y para las diferentes tasas de generación de nuevas conexiones, $\lambda_{n,c}$.



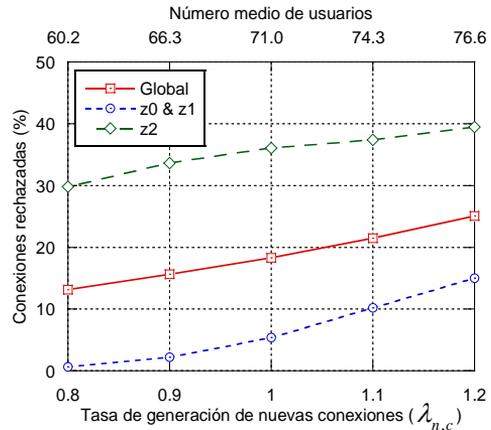
a1) Porcentaje de TUs descartados, considerando la tasa media de generación de tráfico



a2) Porcentaje de conexiones rechazadas, considerando la tasa media de generación de tráfico



b1) Porcentaje de TUs descartados, considerando la tasa requerida equivalente, obtenida mediante la aproximación Gaussiana



b2) Porcentaje de conexiones rechazadas, considerando la tasa requerida equivalente, obtenida mediante la aproximación Gaussiana

Figura 6.3: Resultados para la estrategia CP_teo (Modelo ON-OFF)

Si en primer lugar nos centramos en la alternativa que considera directamente la tasa media de generación de tráfico (Figura 6.3(a1) y Figura 6.3(a2)), se puede ver que el porcentaje de conexiones rechazadas en la zona exterior de la celda es bastante elevado respecto al escaso porcentaje de rechazo en la zona interior de la celda. Esto es debido a dos factores. El primer factor es que la estimación teórica del consumo de los usuarios exteriores es más elevada que la estimación del consumo de los usuarios interiores. Por lo tanto, los usuarios exteriores que intentan acceder a la celda necesitan que exista una mayor cantidad de recursos disponibles para ser admitidos. El segundo factor es que se considera que los usuarios exteriores solo acceden a los recursos de la

subbanda exterior del sector al que pertenecen, mientras que los usuarios interiores acceden a los recursos de la subbanda interior de la celda completa. Por lo tanto, aunque en promedio la misma cantidad de usuarios intenten acceder a la celda en cada zona, y aunque el reparto de RBs entre las subbandas sea equitativo al número promedio de usuarios que pueden acceder a ellos (18RBs en la subbanda interior para los usuarios de las zonas 0 y 1, y 9RBs en la subbanda exterior para los usuarios de la zona 2), el porcentaje de rechazo es más alto para los usuarios exteriores, ya que estos solo acceden a los recursos exteriores de su propio sector, mientras que los usuarios interiores acceden a los recursos interiores de toda la celda. Esta alternativa de emplear directamente la tasa media de generación de tráfico, proporciona una estimación de los recursos requeridos por los usuarios demasiado optimista y no protege al sistema, superándose la cota de descarte objetivo cuando se incrementa el número de usuarios que intentan acceder al sistema.

En la alternativa que considera la tasa equivalente obtenida mediante la aproximación Gaussiana (Figura 6.3(b1) y Figura 6.3(b2)) también se puede observar la elevada diferencia de porcentaje de conexiones rechazadas entre los usuarios exteriores e interiores, debido igualmente a los dos factores comentados. Si se comparan ambas alternativas se puede observar que cuando se aplica la aproximación Gaussiana para obtener la tasa equivalente, el porcentaje de conexiones rechazadas es bastante más elevado, ya que la tasa equivalente es más alta que la tasa media de generación de tráfico, y por lo tanto se estima que los usuarios requieren una mayor cantidad de recursos para satisfacer sus requisitos. La ventaja de la alternativa de emplear la aproximación Gaussiana es que se consigue reducir el porcentaje de descarte de TUs, evitando que se supere la cota de descarte objetivo del 1%. Sin embargo, esta protección que proporciona al sistema es a costa de un porcentaje de rechazo de conexiones excesivo, ya que la aproximación Gaussiana proporciona una estimación de la tasa requerida de los usuarios bastante conservadora.

6.6.2.2 Partición completa de recursos con medidas reales del consumo de recursos (CP_{med})

En la Figura 6.4 se representan los resultados para la estrategia de partición completa de recursos frecuenciales estimando el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados a la celda a partir de las medidas de consumo almacenadas para cada usuario (CP_{med}). Para estimar la demanda del usuario que intenta acceder a la celda, se emplea como tasa requerida la tasa media de generación de tráfico (T_{req}^{med}). En este caso no tiene sentido considerar la aproximación Gaussiana ya que la estimación del consumo de los usuarios actualmente conectados a la celda no es teórica.

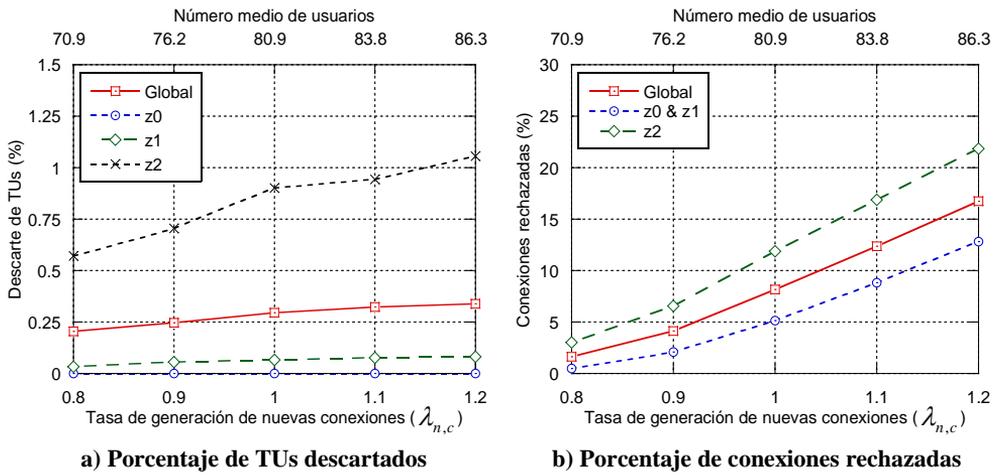


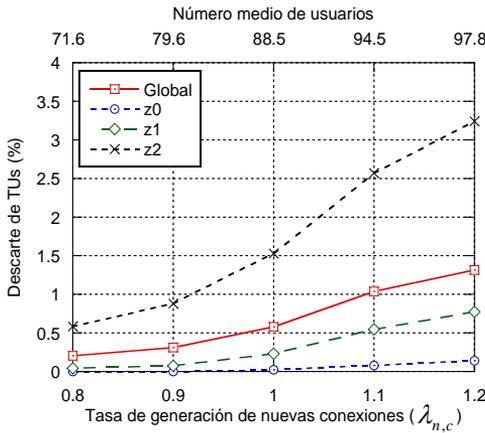
Figura 6.4: Resultados para la estrategia CP_med (Modelo ON-OFF)

De la misma forma que en la estrategia CP_teo, como la estimación de la demanda de recursos de los usuarios exteriores que intentan acceder a la celda es superior a la de los usuarios interiores, y como se considera que los usuarios exteriores pueden acceder solo a los recursos de la subbanda exterior de su propio sector, el porcentaje de rechazo de conexiones en la zona exterior es superior al porcentaje de rechazo en la zona interior. La diferencia en el porcentaje de conexiones rechazadas entre usuarios interiores y exteriores es menor cuando se considera el consumo basado en las medidas de los UEs (CP_med), que cuando se estima el consumo de forma teórica (CP_teo). Esto es debido a que el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados a la celda se obtiene en base a las medidas del consumo real del usuario durante las últimas subtramas. Estas medidas sí consideran que el scheduling puede asignar recursos de la subbanda interior a los usuarios exteriores, y recursos de la subbanda exterior a los usuarios interiores. Por lo tanto, cuando un usuario de la zona exterior intenta acceder a la celda, los usuarios exteriores actualmente conectados a la celda pueden haber estado recibiendo recursos en la subbanda interior de toda la celda, además de haber recibido recursos en la subbanda exterior. Los usuarios interiores y exteriores del sector habrán estado compitiendo por los recursos de la subbanda interior de toda la celda y por los recursos de la subbanda exterior del sector de forma conjunta, mientras que en la estrategia CP_teo se considera que, todos los usuarios exteriores ya admitidos en la celda están consumiendo recursos únicamente en la subbanda exterior del sector. Esto provoca que el porcentaje de rechazo de conexiones en la zona exterior no supere tanto al porcentaje de rechazo en la zona interior como en el caso de la estrategia CP_teo.

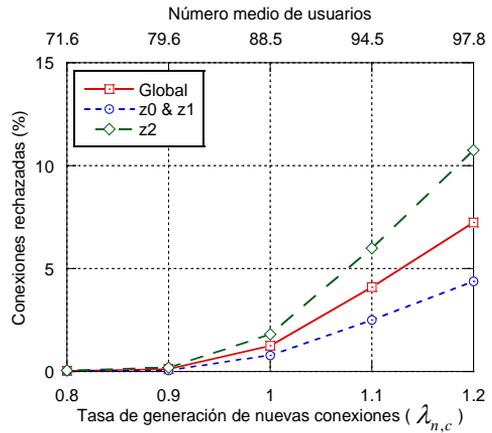
Como se puede apreciar al comparar los resultados de la Figura 6.3 y la Figura 6.4, el porcentaje de conexiones rechazadas, cuando la cantidad de usuarios que intentan acceder a la celda no es muy alta, es más bajo cuando se emplea la estrategia CP_med. Además, a medida que se incrementa la cantidad de usuarios que intentan acceder a las celdas, la estrategia CP_med proporciona una mayor protección ante la degradación de las prestaciones que la estrategia CP_teo empleando la tasa media de generación de tráfico (Figura 6.3(a1)), sin llegar a los excesivos porcentajes de rechazo obtenidos por la estrategia CP_teo empleando la aproximación Gaussiana para calcular la tasa equivalente de los usuarios (Figura 6.3(b1) y Figura 6.3(b2)). Gracias a que la estrategia CP_med estima el consumo de los usuarios actualmente conectados empleando las medidas del consumo real de los usuarios durante las últimas subtramas, es capaz de estimar de forma más realista el consumo acumulado de la celda, teniendo en cuenta además cómo va repartiendo los recursos el algoritmo de scheduling entre los diferentes usuarios. Por lo tanto, la estimación del consumo de recursos de los usuarios actualmente admitidos en base a las medidas de consumo almacenadas para cada usuario obtiene mejores prestaciones, mejorando la eficiencia del sistema.

6.6.2.3 Reparto completo de recursos con estimación teórica de los recursos consumidos (CS_teo)

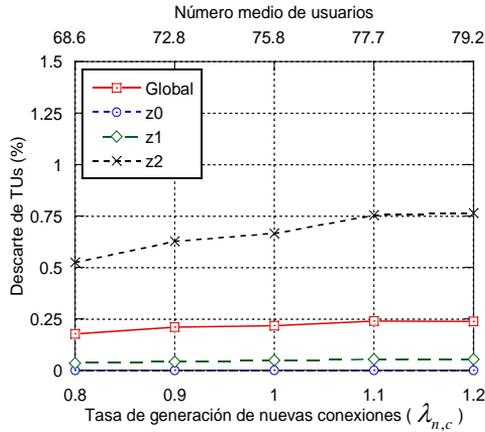
En este subapartado se presentan los resultados obtenidos para la estrategia basada en un reparto completo de recursos frecuenciales, estimando tanto el consumo de recursos de los usuarios actualmente admitidos como la demanda de recursos del usuario que intenta acceder a la celda de forma teórica (CS_teo). A diferencia de las estrategias basadas en una partición completa de los recursos (CP_teo y CP_med), en la estrategia CS_teo se considera que un usuario, tanto interior como exterior, puede acceder a todos los recursos de la subbanda interior de la celda y a los recursos de la subbanda exterior de su sector. En la Figura 6.5 se representan los resultados para esta estrategia de CAC, empleando tanto la alternativa que considera directamente la tasa media de generación de tráfico, como la alternativa que considera la tasa equivalente obtenida mediante la aproximación Gaussiana.



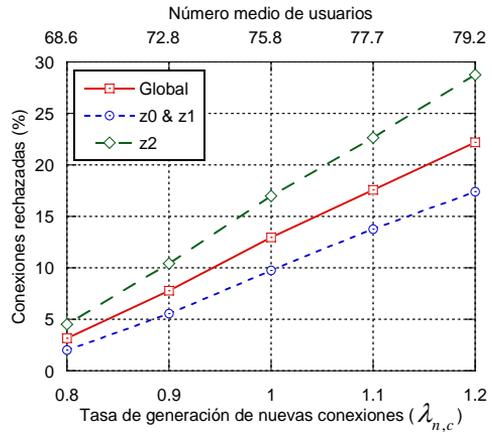
a1) Porcentaje de TUs descartados, considerando la tasa media de generación de tráfico



a2) Porcentaje de conexiones rechazadas, considerando la tasa media de generación de tráfico



b1) Porcentaje de TUs descartados, considerando la tasa requerida equivalente, obtenida mediante la aproximación Gaussiana



b2) Porcentaje de conexiones rechazadas, considerando la tasa requerida equivalente, obtenida mediante la aproximación Gaussiana

Figura 6.5: Resultados para la estrategia CS_teo (Modelo ON-OFF)

Si se comparan los resultados obtenidos con esta estrategia CS_teo, con los resultados obtenidos con su estrategia equivalente basada en partición completa (CP_teo), como era de esperar se puede observar que la diferencia entre el porcentaje de rechazo de conexiones en la zona interior y el porcentaje de rechazo en la zona exterior es significativamente menor al emplear la estrategia CS_teo. Esto es debido a que en la estrategia CS_teo se considera que un usuario interior puede recibir recursos de la subbanda exterior, y de igual manera, un usuario exterior puede recibir recursos de la subbanda interior. Por lo tanto, la diferencia en el porcentaje de rechazo entre usuarios interiores y exteriores se debe únicamente a que la estimación de la demanda de recursos de los usuarios

exteriores que intentan acceder a la celda es mayor que la de los usuarios interiores. En esta estrategia basada en un reparto completo de recursos, cuando un usuario exterior intenta acceder a la celda, se considera que puede acceder a los recursos de la subbanda interior de toda la celda y a los recursos de la subbanda exterior del sector de forma conjunta, reduciéndose notablemente el porcentaje de rechazo de conexiones en la zona exterior, y reduciéndose de esta forma el porcentaje global de conexiones rechazadas. Por lo tanto, el enfoque de realizar un reparto completo de recursos, en lugar de repartir los recursos por zonas, proporciona mejores prestaciones al sistema, ya que permite reducir el porcentaje de rechazo cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada y además proporciona un tratamiento más similar a conexiones interiores y exteriores, aprovechando la flexibilidad del esquema de asignación de recursos.

Cuando se emplea la alternativa que considera directamente la tasa media de generación de tráfico, se puede observar que la política de CAC no proporciona suficiente protección y se degradan las prestaciones del sistema, superándose la cota objetivo de descarte de TUs del 1%, debido a que la estimación de los recursos requeridos por los usuarios es demasiado optimista. Por otro lado, cuando se emplea la alternativa que considera la tasa equivalente obtenida mediante la aproximación Gaussiana, la política de CAC proporciona suficiente protección a medida que se incrementa la tasa de generación de nuevas conexiones, pero a costa de un porcentaje de rechazo de conexiones excesivo, debido a que la aproximación Gaussiana proporciona una estimación de la tasa requerida de los usuarios bastante conservadora.

6.6.2.4 Reparto completo de recursos con medidas reales del consumo de recursos (CS_med)

La estrategia CS_med también se basa en un reparto completo de los recursos frecuenciales, y de la misma forma que en la estrategia previa CS_teo, se considera que un usuario, tanto interior como exterior, puede acceder a todos los recursos de la subbanda interior de la celda y a los recursos de la subbanda exterior de su sector. La diferencia con la estrategia CS_teo es que en la estrategia CS_med el consumo de los usuarios actualmente admitidos en la celda se estima empleando las medidas de consumo almacenadas para cada usuario. Para estimar la demanda del usuario que intenta acceder a la celda, se emplea como tasa requerida la tasa media de generación de tráfico (T_{req}^{med}). En este caso no tiene sentido considerar la aproximación Gaussiana ya que la estimación del consumo de los usuarios actualmente conectados a la celda no es teórica. En la Figura 6.6 se muestran los resultados obtenidos para esta estrategia de CAC.

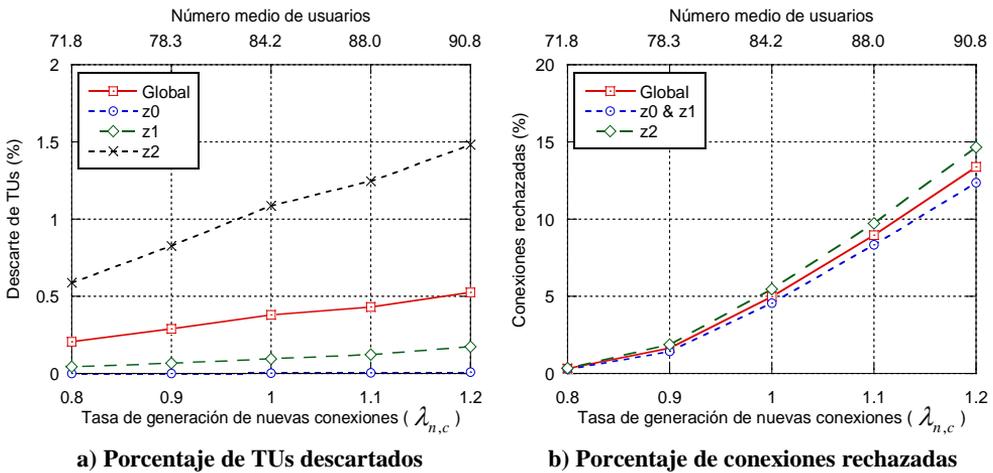


Figura 6.6: Resultados para la estrategia CS_med (Modelo ON-OFF)

Si se comparan los resultados obtenidos con esta estrategia, con los resultados obtenidos para su estrategia equivalente basada en partición completa (CP_med), se puede observar que la diferencia entre el porcentaje de conexiones rechazadas en la zona exterior e interior se reduce notablemente, disminuyendo el porcentaje global de conexiones rechazadas. Esto es debido a que en la estrategia CS_med se considera un reparto completo de recursos, y un usuario exterior que intenta acceder a la celda accedería a la subbanda interior de la celda y a la subbanda exterior del sector de forma conjunta. Como se ha visto en la estrategia previa, este enfoque de realizar un reparto completo de recursos proporciona mejores prestaciones al sistema, reduciendo el porcentaje de rechazo cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada y ofreciendo un tratamiento similar a conexiones interiores y exteriores.

Esta estrategia CS_med, comparada con la estrategia CS_teo, obtiene unas prestaciones intermedias entre la alternativa que emplea la tasa media de generación de tráfico y la alternativa que emplea la aproximación Gaussiana para calcular la tasa equivalente de los usuarios. La estrategia CS_med rechaza un mayor porcentaje de conexiones que la estrategia CS_teo empleando directamente la tasa media de generación de tráfico, disminuyendo la degradación de las prestaciones ocurrida cuando se incrementa el número de UEs que intentan acceder a las celdas. Sin embargo, la estrategia CS_med comienza a rechazar conexiones incluso cuando el número de usuarios que intenta acceder a cada celda no es demasiado elevado, pudiéndose haber permitido su acceso sin superar la cota objetivo de descarte de TUs del 1% para los usuarios exteriores. Por otro lado, el porcentaje de conexiones rechazadas cuando se aplica la estrategia CS_med no es tan elevado como el obtenido cuando se aplica la estrategia CS_teo con la aproximación Gaussiana para

calcular la tasa equivalente. Esto permite un funcionamiento más eficiente del sistema al reducir el porcentaje de rechazo, sin embargo, cuando el número de usuarios que intentan acceder a cada celda crece, la estrategia CS_med no proporciona suficiente protección y se supera la cota objetivo de descarte de TUs del 1%. De igual forma que en la estrategia CP_med, los resultados obtenidos cuando se emplea la estrategia CS_med muestran que la estimación del consumo de recursos de los usuarios actualmente admitidos en base a las medidas de consumo almacenadas para cada usuario refleja mejor el comportamiento real del sistema que la estimación teórica del consumo, permitiendo mejorar las prestaciones del sistema. Las medidas de consumo de los propios usuarios reflejan fielmente cómo se van repartiendo los recursos, las condiciones de canal que están observando los usuarios, etc., y esto permite obtener una estimación más realista de su consumo.

En la Figura 6.6(b) se observa que la diferencia entre el porcentaje de conexiones rechazadas en la zona exterior y el porcentaje de conexiones rechazadas en la zona interior es menor que para el caso de la estrategia CS_teo (Figura 6.5(a2) y Figura 6.5(b2)). En la estrategia CS_teo, el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados se estima de forma teórica, considerando que los usuarios exteriores actualmente admitidos emplearán en primer lugar los recursos de la subbanda exterior, y una vez completada dicha subbanda, emplearán los recursos de la subbanda interior (propuesta explicada en el subapartado 6.3.3). Mientras que en la estrategia CS_med, el consumo de recursos de los usuarios actualmente admitidos se estima empleando las medidas de consumo almacenadas para cada usuario, y el scheduling puede asignar recursos de la subbanda interior a usuarios exteriores si observan buenas condiciones de canal en dichos recursos. Considerando esta diferencia entre ambas estrategias de CAC, cuando un usuario de la zona exterior intenta acceder a la celda, es más probable que cuando se emplea la estrategia CS_teo, el resultado de la estimación del consumo de los usuarios actualmente conectados sea que la subbanda exterior se considere ocupada completamente y la demanda de recursos del usuario exterior que intenta acceder se obtenga empleando la eficiencia offline para la subbanda interior. Mientras que cuando se emplea la estrategia CS_med, esta situación es menos probable y en la mayoría de casos la demanda de recursos del usuario exterior que intenta acceder puede obtenerse empleando la eficiencia offline para la subbanda exterior, ya que se considera que hay recursos suficientes en dicha subbanda. Por lo tanto, la demanda de recursos del usuario exterior es menor al emplear la eficiencia offline para los recursos de la subbanda exterior.

6.6.2.5 Conclusiones

Con los resultados que se han revisado en este subapartado, queda claro que el enfoque de estimar el consumo de los usuarios actualmente conectados empleando las medidas del consumo real de los usuarios durante las últimas subtramas permite estimar de forma más realista el consumo acumulado de la celda. Y es que, el uso de las medidas de los usuarios refleja fielmente cómo se van repartiendo los recursos, las condiciones de canal que están observando los usuarios, etc., y esto permite obtener una estimación más realista de su consumo que la obtenida de forma teórica, mejorando la eficiencia del sistema. Por otro lado, las estrategias basadas en un reparto completo de los recursos frecuenciales proporcionan mejores prestaciones, ya que permiten reducir el porcentaje de rechazo cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada y además proporcionan un tratamiento más similar a conexiones interiores y exteriores, aprovechando la flexibilidad del esquema de asignación de recursos. Por lo tanto, la estrategia CS_med es la que mejores prestaciones ofrece y en los siguientes apartados se proponen estrategias de CAC basadas en esta estrategia, y considerando variantes con el objetivo de mejorar las prestaciones del sistema.

6.7 Estrategias avanzadas de CAC con reparto completo de recursos

En este apartado se presentan varias estrategias de CAC basadas en la estrategia de reparto completo de recursos CS_med, sobre las que se añaden variaciones con el fin de mejorar las prestaciones del mecanismo de CAC, tratando de reducir todo lo posible el porcentaje de conexiones rechazadas en situaciones en las que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada, al mismo tiempo que tratando de proteger al sistema a medida que la tasa de generación de nuevas conexiones aumenta, evitando una degradación de las prestaciones de las conexiones admitidas en el sistema.

6.7.1 Estrategia con reparto completo de recursos, basada en medidas reales del consumo y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_ep)

Se ha visto en los resultados que la estrategia CS_med comienza a rechazar conexiones cuando el número de usuarios que intentan acceder al sistema no es demasiado elevado, pudiéndose haber permitido su acceso sin superar la cota objetivo de descarte de TUs. Es decir, en estas situaciones, la estimación de los recursos consumidos por los usuarios actualmente conectados, en base a sus propias medidas, es demasiado pesimista, obteniéndose una estimación de

consumo más alta que el consumo de recursos realmente requerido para satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios. Hay que tener en cuenta que el algoritmo de scheduling asigna a cada usuario el MCS más alto posible, garantizando siempre que la SINR recibida por el usuario es superior al umbral de SINR requerida. Sin embargo, si la tasa que puede transmitirse con el MCS seleccionado es superior a los datos almacenados en los buffers de la conexión del usuario, el scheduling seleccionará un MCS más bajo, ajustando la tasa transmitida a los datos disponibles en los buffers. Por lo tanto, es especialmente en situaciones en las que la carga del sistema no es muy elevada, cuando este ajuste del MCS se da con mayor frecuencia, conllevando una estimación pesimista de los recursos consumidos por los usuarios. Con el objetivo de disminuir la probabilidad de rechazo de conexiones en estas situaciones, y mejorar la eficiencia del sistema, sobre la estrategia CS_med se añade un margen (ε) al total de recursos disponibles en la política de admisión (ecuación (6.32)).

o *El usuario, tanto interior como exterior, solo se acepta si:*

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}(t) + NRBext_{cons,s}(t) + NRB_{req}^u \leq \quad (6.32)$$

$$\leq N_{total,int,c} + N_{total,ext,s} + \varepsilon$$

6.7.2 Estrategia con reparto completo de recursos, ponderando las medidas reales del consumo con un factor corrector y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_pon_ep)

Como se ha comentado, cuando la celda no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS del tráfico cursado por un usuario, las medidas de los recursos consumidos por el usuario en las últimas subtramas no representan fielmente los recursos que necesita el usuario para satisfacer sus requisitos, sino que dan como resultado un consumo de RBs inferior al realmente requerido. Por lo tanto, en esta estrategia se ponderan las estimaciones de los RBs consumidos por cada usuario con un factor corrector ($F_{correc}^u(t)$), que considera el grado de satisfacción de los requisitos de QoS que está observando cada usuario u , tal y como se describe en el subapartado 6.3.5. La estrategia CS_med_pon_ep es una variante de la estrategia anterior CS_med_ep, con la única diferencia de que las estimaciones de los RBs consumidos por los usuarios actualmente conectados a la celda son ponderadas con un factor corrector (6.33).

o El usuario, tanto interior como exterior, solo se acepta si:

$$\sum_{\forall s \in S} NRBint_{cons,s}(t) + NRBext_{cons,s}(t) + NRB_{req}^u \leq N_{total,int,c} + N_{total,ext,s} + \varepsilon \quad (6.33)$$

donde

$$NRBint_{cons,s}(t) = \sum_{\forall u \in U_s} F_{correc}^u(t) \cdot NRBint_{cons}^u(t)$$

$$NRBext_{cons,s}(t) = \sum_{\forall u \in U_s} F_{correc}^u(t) \cdot NRBext_{cons}^u(t)$$

En los siguientes subapartados se describen los dos factores correctores propuestos para ponderar las medidas de consumo de recursos de los usuarios. El primero de ellos es un factor básico que considera la satisfacción de la tasa requerida de los usuarios. Como los dos modelos de tráfico que se emplean en este capítulo tienen restricciones de retardo, en el segundo factor se considera los datos que el usuario tiene acumulados en los buffers de su conexión.

6.7.2.1 Factor que considera la satisfacción de la tasa requerida

El primer factor que se considera para ponderar la estimación del consumo de RBs de cada usuario u es el que se representa en la ecuación (6.34), y está basado en la satisfacción de la tasa requerida de los usuarios. \bar{T}_{alc}^u es la tasa promedio alcanzada por el usuario u , y se obtiene promediando la tasa que ha recibido el usuario durante las últimas subtramas. \bar{T}_{req}^u es la tasa promedio requerida por el usuario u , y se obtiene promediando la tasa que ha generado el usuario durante las últimas subtramas. Ambas estimaciones de tasa se obtienen a partir de una ventana de promediado de igual longitud que la ventana de promediado que se emplea en la estimación del consumo de RBs del usuario basada en medidas. De esta forma, se emplea el mismo periodo de observación para todas las estimaciones.

$$F_{correc}^u = \min \left(\max \left(\frac{\bar{T}_{req}^u}{\bar{T}_{alc}^u}, Cota_{min} \right), Cota_{max} \right) \quad (6.34)$$

Si por algún motivo, la tasa alcanzada \bar{T}_{alc}^u es demasiado baja, el valor del factor corrector sería muy elevado, provocando una estimación del consumo de recursos demasiado elevada y provocando un comportamiento inestable del CAC. Por lo tanto, para evitar este comportamiento y mantener el valor de la estimación del consumo dentro de unos valores razonables, se añade una cota máxima ($Cota_{max}$), que limita el valor máximo que puede tomar el factor corrector. Por otro lado, el factor corrector se ha considerado para ponderar las

medidas del consumo de recursos de los usuarios en las situaciones en las que la celda no es capaz de satisfacer sus requisitos de QoS. Por lo tanto, para evitar que el factor tome valores bajos en las situaciones en las que la tasa alcanzada (\bar{T}_{alc}^u) es superior a la tasa requerida (\bar{T}_{req}^u), es decir, en situaciones en las que se están satisfaciendo los requisitos de QoS del usuario, se añade una cota mínima ($Cota_{min}$), para limitar el valor mínimo que puede alcanzar el factor corrector.

6.7.2.2 Factor que considera los datos almacenados en los buffers

En lugar de considerar exclusivamente la tasa requerida del usuario, en este factor corrector se aplica una alternativa que estima la tasa adicional que el usuario debería cursar para ser capaz de transmitir los paquetes almacenados en los buffers, sin que estos sean descartados por superar la cota máxima de retardo. Se estima la tasa a recuperar por el usuario u (\bar{T}_{recup}^u) mediante la ecuación (6.35), donde S_{TU} representa el tamaño en bits de un TU, Q^u representa el número de TUs almacenados en los buffers de la conexión del usuario, D_{max}^u es la cota máxima de retardo para el servicio cursado por el usuario y d_{HOL}^u es el retardo acumulado del TU que se encuentra en la cabecera de los buffers de la conexión del usuario. Por lo tanto, \bar{T}_{recup}^u es el cociente entre el tráfico retrasado almacenado en los buffers de la conexión del usuario y el tiempo restante para poder cursar ese tráfico retrasado, que viene determinado por la cota de retardo asociada al servicio cursado por el usuario.

$$\bar{T}_{recup}^u = \frac{S_{TU} \cdot Q^u}{D_{max}^u - d_{HOL}^u} \quad (6.35)$$

A partir de esta tasa a recuperar por el usuario u se obtiene su factor corrector mediante la ecuación (6.36). Tal y como se ha definido en el subapartado anterior, \bar{T}_{alc}^u es la tasa promedio alcanzada por el usuario u , y \bar{T}_{req}^u es la tasa promedio requerida por el usuario u . Se ha considerado que la tasa a recuperar por el usuario (\bar{T}_{recup}^u) se divida por la tasa promedio que potencialmente podría haber recibido (\bar{T}_{pot}^u), ya que, si existen paquetes retrasados en los buffers de la conexión del usuario, el usuario podrá recibir las asignaciones con el máximo MCS posible. \bar{T}_{pot}^u es la tasa promedio que potencialmente podría haber recibido el usuario u , y se obtiene considerando que en todas las asignaciones de recursos de las últimas subtramas el usuario recibe el MCS más alto posible. Como se ha comentado, el algoritmo de scheduling asigna a cada usuario el MCS más alto posible, sin embargo, si la tasa que puede transmitirse con el MCS seleccionado es superior a los datos almacenados en los buffers de la conexión del usuario, el scheduling seleccionará un MCS más bajo.

Por lo tanto, \bar{T}_{pot}^u será siempre mayor o igual a la tasa promedio recibida realmente por el usuario, \bar{T}_{alc}^u .

$$F_{correc}^u = \min \left(\max \left(\frac{\bar{T}_{req}^u}{\bar{T}_{alc}^u} + \frac{\bar{T}_{recup}^u}{\bar{T}_{pot}^u}, Cota_{min} \right), Cota_{max} \right) \quad (6.36)$$

Las tres estimaciones de tasa (\bar{T}_{alc}^u , \bar{T}_{req}^u y \bar{T}_{pot}^u) se obtienen a partir de una ventana de promediado de igual longitud que la ventana de promediado que se emplea en la estimación del consumo de RBs del usuario basada en medidas. De esta forma, se emplea el mismo periodo de observación para todas las estimaciones. De igual forma que en el anterior factor corrector, se añade una cota máxima ($Cota_{max}$) y una cota mínima ($Cota_{min}$), para mantener el valor de la estimación del consumo dentro de unos valores razonables.

6.7.3 Estrategia con reparto completo de recursos, ponderando las medidas reales del consumo con un factor corrector y ajustando adaptativamente el margen de recursos (CS_med_pon_ep_adap)

Si se considera un valor constante para el margen que se añade al total de recursos disponibles (ε), puede ser que ese valor de ε sea adecuado para ciertas condiciones de carga del sistema, mientras que para otras condiciones de carga sería más adecuado aplicar otro valor de ε . Con el objetivo de adaptar de forma dinámica el valor de ε , en esta estrategia CS_med_pon_ep_adap (6.37) se lleva a cabo un procedimiento de adaptación del margen de recursos: ε_{adap} . De la misma forma que en la estrategia de CAC previa, el consumo de recursos de los usuarios actualmente conectados se obtiene ponderando las medidas de consumo de los usuarios mediante un factor corrector, aplicándose la propuesta descrita en el subapartado 6.3.5.

o *El usuario, tanto interior como exterior, solo se acepta si:*

$$\sum_{\forall s \in S} NRB_{int,cons,s}(t) + NRB_{ext,cons,s}(t) + NRB_{req}^u \leq \quad (6.37)$$

$$\leq N_{total,int,c} + N_{total,ext,s} + \varepsilon_{adap}$$

Para ajustar adaptativamente el valor de ε_{adap} se utiliza el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios con peores prestaciones dentro del sistema. En primer lugar, se obtiene el porcentaje de TUs descartados que ha observado cada usuario durante las últimas subtramas. Para ello se almacenan en ventanas de promediado el número de TUs descartados y el número de TUs generados en cada subtrama durante un periodo de observación. Una vez calculados los porcentajes de descarte de TUs para todos los usuarios de la red, se ordenan de

mayor a menor porcentaje de descarte y se seleccionan aquellos usuarios que han recibido peores prestaciones, escogiendo un determinado porcentaje de los usuarios que han observado mayor descarte de TUs. La definición del porcentaje de usuarios que se seleccionan determinará la rapidez con la que el valor de ε_{adap} reacciona ante situaciones de congestión.

Este procedimiento de ajuste adaptativo del valor de ε_{adap} se realiza de forma periódica, considerando una escala temporal más grande que el periodo de observación considerado en las ventanas de promediado empleadas para la estimación del consumo de RBs de los usuarios, ya que es necesario que transcurra cierto tiempo para poder valorar las prestaciones del sistema tras el último ajuste de ε_{adap} . Para determinar el ajuste del valor de ε_{adap} se emplea el procedimiento descrito en el pseudo-código incluido en la Tabla 6.9. Merece la pena destacar que en la primera ejecución del procedimiento de ajuste de ε_{adap} se inicializa $Med_{min}^{cons} = 0$, y que este procedimiento se realiza de forma global para toda la red, aplicándose el mismo valor de ε_{adap} a todas las celdas.

$$Factor_{desc} = \frac{P_{desc}^{UEs_peores_prest}}{Cota_{desc}^{obj}}$$

if $Factor_{desc} < TH_{min}$ **then**

$$Med_{min}^{cons} = Med_{min}^{cons} + 1$$

if $Med_{min}^{cons} == 3$ **then**

$$Med_{min}^{cons} = 0$$

$$\varepsilon_{adap} = \varepsilon_{adap} + \Delta_{incr}$$

end if

else

$$Med_{min}^{cons} = 0$$

if $Factor_{desc} > TH_{max}$ **then**

$$\varepsilon_{adap} = \varepsilon_{adap} - \Delta_{dism}$$

end if

end if

if $\varepsilon_{adap} < \varepsilon_{min}$ **then**

$$\varepsilon_{adap} = \varepsilon_{min}$$

else if $\varepsilon_{adap} > \varepsilon_{max}$ **then**

$$\varepsilon_{adap} = \varepsilon_{max}$$

end if

Tabla 6.9: Pseudo-código del ajuste adaptativo de ε_{adap}

El factor de descarte ($Factor_{desc}$) se obtiene mediante el cociente entre el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios seleccionados con peores prestaciones ($P_{desc}^{UEs_peores_prest}$) y la cota de descarte de TUs objetivo definida en el sistema ($Cota_{desc}^{obj}$). Se incrementa el valor de ε_{adap} cuando se han obtenido tres medidas consecutivas del factor de descarte por debajo del umbral mínimo (TH_{min}), para intentar garantizar que solo se favorezca el acceso de nuevos usuarios, cuando realmente se están garantizando los requisitos de QoS de los usuarios actualmente conectados. Por el contrario, en cuanto se obtiene una medida del factor de descarte por encima del umbral máximo (TH_{max}), se disminuye el valor de ε_{adap} inmediatamente, para evitar que se degraden las prestaciones de los usuarios actualmente aceptados, ya que esto significa que el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios con peores prestaciones se sitúa cerca o incluso por encima de la cota de descarte objetivo. Por último, se garantiza que el valor final de ε_{adap} se encuentre siempre dentro de unos valores mínimo y máximo (ε_{min} y ε_{max}).

En esta estrategia de CAC se consideran varios parámetros que deben ajustarse buscando las mejores prestaciones para el sistema: porcentaje de usuarios que se seleccionan para obtener $P_{desc}^{UEs_peores_prest}$, los umbrales considerados para el factor de descarte (TH_{min} y TH_{max}), la variación que se va aplicando a ε_{adap} (Δ_{incr} y Δ_{dism}), el valor mínimo y máximo de ε_{adap} (ε_{min} y ε_{max}), así como cada cuanto tiempo se lleva a cabo el procedimiento de adaptación.

6.8 Resultados de las estrategias avanzadas de CAC

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para las estrategias avanzadas de CAC propuestas basadas en un reparto completo de los recursos frecuenciales. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos empleando el modelo de tráfico ON-OFF con restricciones de retardo. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos empleando un modelo de tráfico de transmisión de video en tiempo real para las estrategias de CAC más representativas, con el objetivo de evaluar las prestaciones de estas estrategias con un modelo de tráfico más realista. Para la evaluación de las estrategias avanzadas de CAC se continúan empleando las mismas condiciones de simulación, explicadas en el subapartado 6.6.1, y quedando recogidos los parámetros generales de simulación en la Tabla 6.5.

6.8.1 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico ON-OFF con restricciones de retardo

6.8.1.1 Reparto completo de recursos con medidas reales del consumo y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_ep)

Se ha visto en los resultados que la estrategia CS_med comienza a rechazar conexiones cuando el número de usuarios que intentan acceder al sistema no es demasiado elevado. Por lo tanto, en esta estrategia CS_med_ep se añade un margen ε al total de recursos disponibles en la política de admisión, con el objetivo de reducir el porcentaje de conexiones rechazadas en situaciones en las que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada. En la Figura 6.7(a1) y la Figura 6.7(a2) se representan los resultados cuando se define $\varepsilon = 0.5$ RBs, y en la Figura 6.7(b1) y Figura 6.7(b2) se representan los resultados cuando se aumenta el valor del margen a $\varepsilon = 1$ RB.

Al añadir un margen de 0.5 RBs al total de recursos disponibles considerados en la política de admisión ($N_{total,int,c} + N_{total,ext,s}$), se observa en la Figura 6.7(a2) que se reduce significativamente el porcentaje de conexiones rechazadas. Cuando el margen se incrementa a 1 RB, el porcentaje de conexiones rechazadas se reduce en mayor medida, obteniéndose unos porcentajes de rechazo cercanos a 0. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la estimación del consumo de los usuarios actualmente admitidos puede superar en el momento de la admisión el total de recursos disponibles considerados en la política de admisión ($N_{total,int,c} + N_{total,ext,s}$). Esto es debido a que cuando un usuario intenta acceder a la celda, se inicia el procedimiento de CAC y se estima para cada usuario el consumo de RBs, empleando las medidas tomadas durante las últimas subtramas (periodo de observación). Sin embargo, durante este periodo de observación, que para el modelo de ON-OFF se ha definido en 840 subtramas, puede haber usuarios que ya no estén conectados a la celda y, del mismo modo, puede haber usuarios que hayan sido admitidos recientemente, para los cuales no se dispone todavía de suficientes medidas de su consumo para rellenar por completo la ventana deslizante. Además, también hay que tener en cuenta que en el promediado de las medidas de consumo se emplea el factor β , para dar un mayor peso a las medidas de consumo más recientes. Estos aspectos conllevan a que la estimación de los recursos consumidos por los usuarios actualmente admitidos pueda superar el total de recursos realmente disponibles. Por ello, aunque se añada un margen de 0.5 o 1 RB (ε), la política de admisión puede rechazar el acceso de conexiones a la celda debido a que la estimación del consumo de los usuarios ya admitidos obtenida en esa subtrama supera el total de recursos disponibles, considerando que no

existen recursos suficientes para satisfacer la demanda del usuario que intenta acceder.

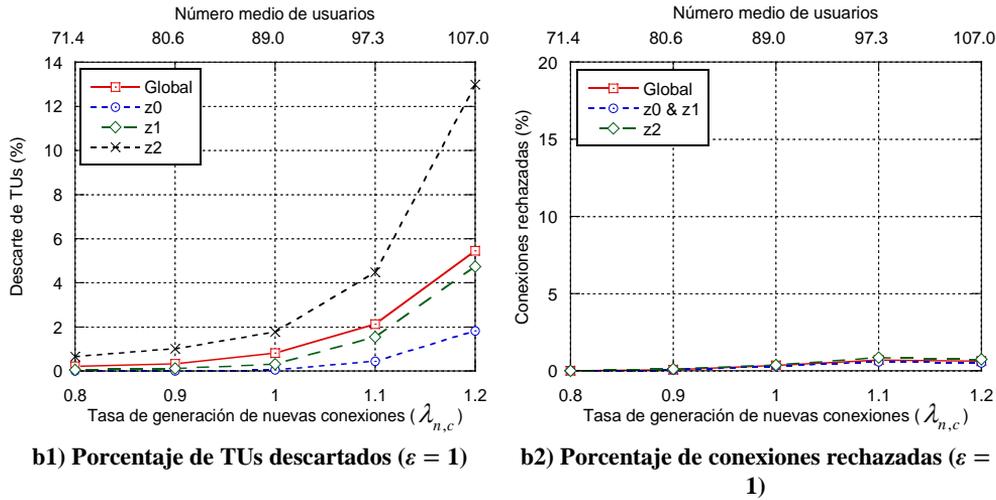
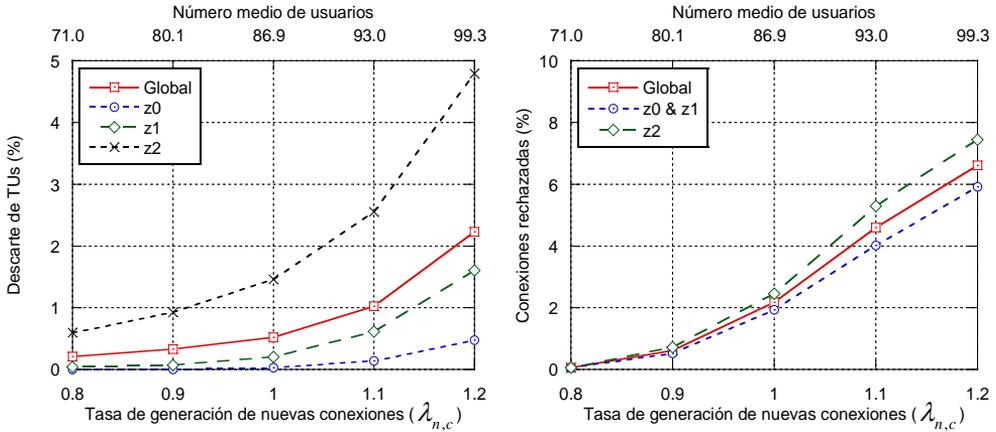


Figura 6.7: Resultados para la estrategia CS_med_ep (Modelo ON-OFF)

Es importante resaltar que para ambos valores de ε , aunque la estrategia CS_med_ep permite reducir el porcentaje de conexiones rechazadas cuando el número de usuarios que intentan acceder al sistema no es muy alto, no proporciona protección cuando se va incrementando la cantidad de usuarios que intentan acceder, provocando que las prestaciones del sistema se vean severamente degradadas en términos del porcentaje de TUs descartados (Figura 6.7(a1) y Figura 6.7(b1)). Esto se debe a que cuando la celda no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios, las medidas de los recursos consumidos en las últimas subtramas no representan fielmente los recursos que

necesitan los usuarios para satisfacer sus requisitos, sino que dan como resultado un consumo de RBs inferior al realmente requerido. Por lo tanto, con el objetivo de mejorar la protección proporcionada por el mecanismo de CAC, se ha propuesto la estrategia CS_med_pon_ep, en la que se ponderan las estimaciones de los RBs consumidos por cada usuario con un factor corrector ($F_{correc}^u(t)$), que considera el grado de satisfacción de los requisitos de QoS que está observando cada usuario u , cuyos resultados se presentan a continuación.

6.8.1.2 Reparto completo de recursos ponderando las medidas con el factor corrector que considera la satisfacción de la tasa requerida y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_pon_ep)

En la Figura 6.8 se presentan los resultados obtenidos para la estrategia CS_med_pon_ep cuando se emplea el factor corrector que considera la satisfacción de la tasa requerida de los usuarios y que se calcula mediante la ecuación (6.34). En los resultados obtenidos para la estrategia previa CS_med_ep se ha visto que un valor de $\varepsilon = 1$ permite reducir el porcentaje de conexiones rechazadas prácticamente a cero. Por lo tanto, con el objetivo de conseguir un bajo rechazo de conexiones cuando el número de UEs que intentan acceder al sistema no es muy alto, y para evaluar si el factor corrector es capaz de mejorar la protección ofrecida por la estrategia previa a medida que aumenta el número de UEs que intentan acceder a la red, se presentan los resultados para $\varepsilon = 1$ (Figura 6.8(a1) y Figura 6.8(a2)), y además también para un valor más alto del margen de recursos como es $\varepsilon = 2.5$ (Figura 6.8(b1) y Figura 6.8(b2)).

El factor corrector se considera para ponderar las medidas del consumo de recursos de los usuarios en las situaciones en las que la celda no es capaz de satisfacer sus requisitos de QoS. Por lo tanto, para evitar que el factor tome valores por debajo de 1 para usuarios a los que la celda está satisfaciendo los requisitos de QoS de su conexión se considera $Cota_{min} = 1$. Por otro lado, para aquellos usuarios que no son capaces de satisfacer sus requisitos de QoS por observar malas condiciones de canal se considera $Cota_{max} = 1.25$, con el objetivo de no obtener estimaciones del consumo de RBs demasiado altas.

Como se observa en la Figura 6.8(a1) y en la Figura 6.8(b1), este factor corrector no proporciona suficiente protección cuando se incrementa la tasa de generación de nuevas conexiones, degradándose las prestaciones y superándose la cota objetivo de descarte de TUs del 1%. El objetivo del factor corrector es que el sistema sea capaz de reaccionar cuando no se estén satisfaciendo los requisitos de QoS de los usuarios. De esta forma, cuando la carga del sistema aumente y se comiencen a no satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios, el

factor corrector debería incrementar las estimaciones de consumo de recursos de los usuarios, ya que con los recursos que están recibiendo actualmente no se están satisfaciendo sus requisitos. Y así, el resultado final sería que se incrementaría el porcentaje de conexiones rechazadas, protegiendo a los usuarios actualmente admitidos de una degradación de sus prestaciones y evitando que el sistema se congestione.

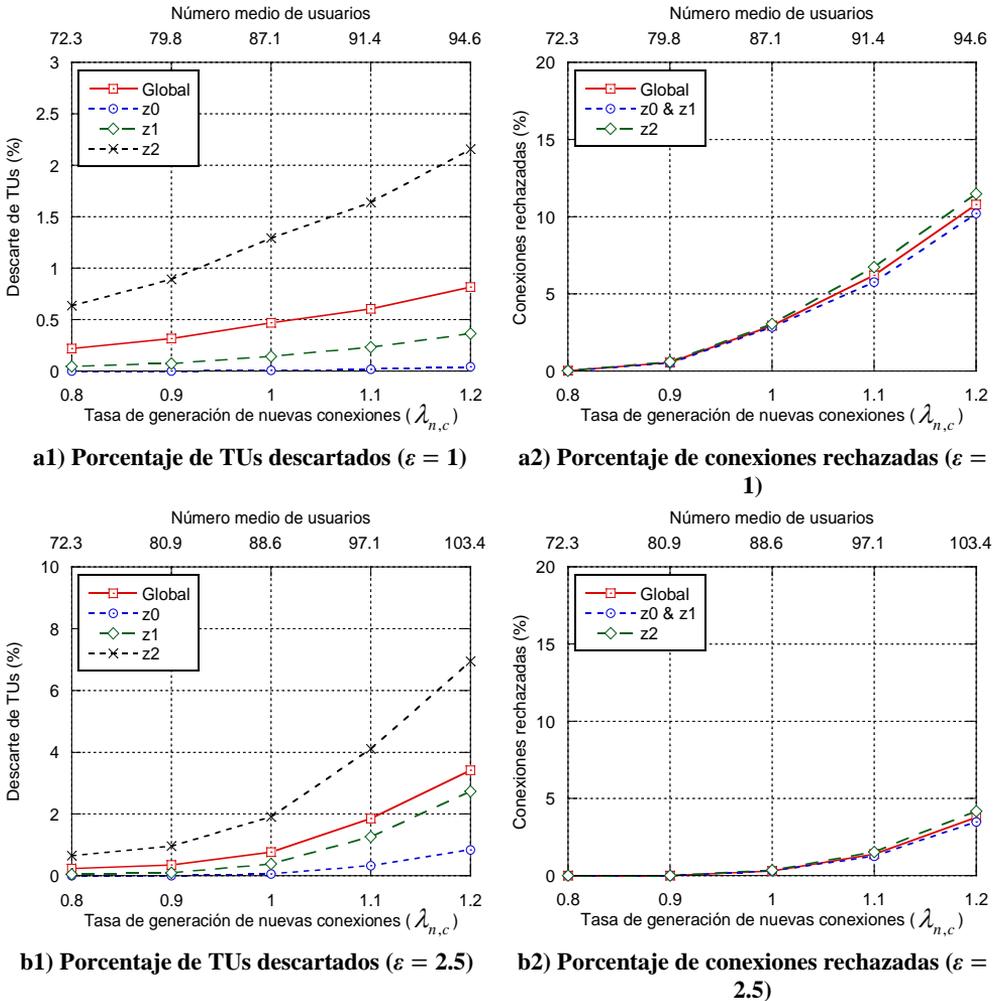


Figura 6.8: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Satisfacción de tasa (Modelo ON-OFF)

Sin embargo, un porcentaje de descarte de TUs del 1% no reduce significativamente la tasa promedio alcanzada por el usuario (\bar{T}_{alc}^u) respecto a su tasa promedio requerida (\bar{T}_{req}^u). Eso implica que este factor corrector no refleja adecuadamente el grado de satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios

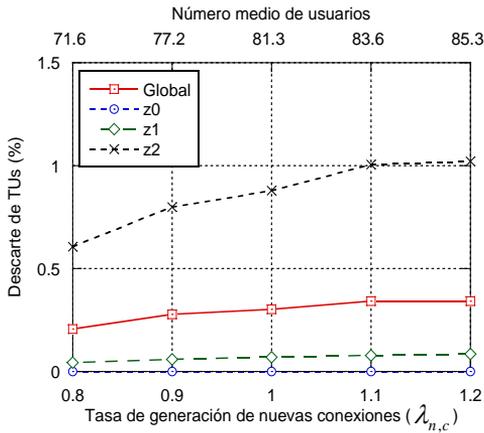
y, por lo tanto, no proporciona suficiente protección ante el incremento del número de usuarios que intentan acceder al sistema, degradándose las prestaciones del sistema.

6.8.1.3 Reparto completo de recursos ponderando las medidas con el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers y añadiendo un margen al total de recursos disponibles ($CS_med_pon_ep$)

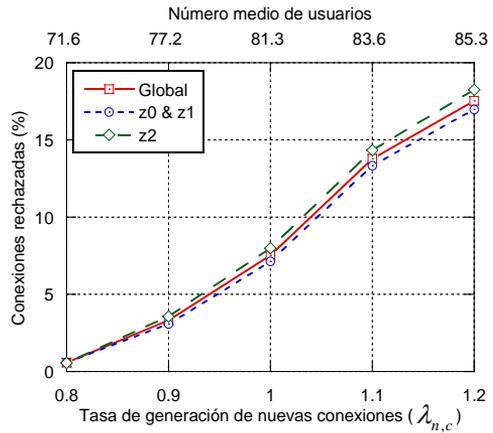
Se ha visto que el factor corrector que considera exclusivamente la satisfacción de la tasa requerida del usuario no proporciona suficiente protección a medida que aumenta el número de UEs que intentan acceder al sistema. Por ello, con el objetivo de mejorar la protección del mecanismo de CAC se ha propuesto otro factor corrector, en el que se estima la tasa adicional (\bar{T}_{recup}^u) que el usuario debería cursar para ser capaz de transmitir los paquetes almacenados en los buffers, sin que estos sean descartados por superar la cota máxima de retardo, y que se calcula como se muestra en la ecuación (6.36). De esta forma, y como el modelo de tráfico ON-OFF es un modelo con restricciones de retardo, el factor corrector tiene en cuenta de forma directa si los usuarios empiezan a acumular paquetes de datos en sus buffers por no disponer de recursos frecuenciales suficientes.

Se presentan los resultados obtenidos para los mismos valores del margen de recursos que los aplicados en el subapartado anterior, representando en la Figura 6.9(a1) y la Figura 6.9(a2) los resultados para $\varepsilon = 1$, y en la Figura 6.9(b1) y la Figura 6.9(b2) los resultados para $\varepsilon = 2.5$. Respecto a los límites del factor corrector, y de la misma forma que en el subapartado anterior, se ha considerado $Cota_{min} = 1$ y $Cota_{max} = 1.25$.

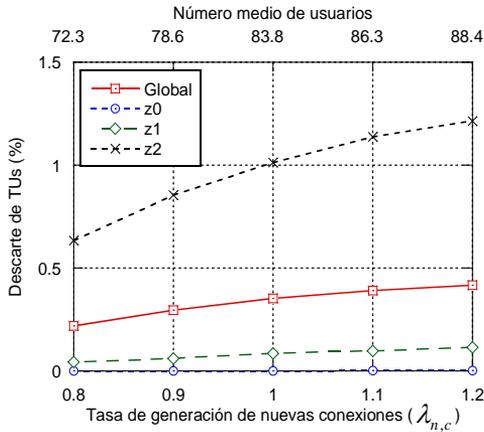
Si nos centramos en primer lugar en los resultados obtenidos cuando $\varepsilon = 1$, se puede observar que este factor corrector proporciona protección cuando se aumenta el número de usuarios que intentan acceder al sistema. Sin embargo, este factor provoca un incremento en el porcentaje de conexiones rechazadas cuando el número de usuarios que intenta acceder a cada celda no es demasiado elevado, pudiéndose haber permitido el acceso a un mayor número de usuarios, sin superar la cota objetivo de descarte de TUs del 1%. Cuando se incrementa el margen de recursos a $\varepsilon = 2.5$, se reduce el porcentaje de conexiones rechazadas para los casos en los que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada, pero al mismo tiempo, el factor corrector no es capaz de proporcionar suficiente protección cuando se incrementa la tasa de generación de nuevas conexiones, degradándose las prestaciones del sistema y superándose la cota objetivo de descarte.



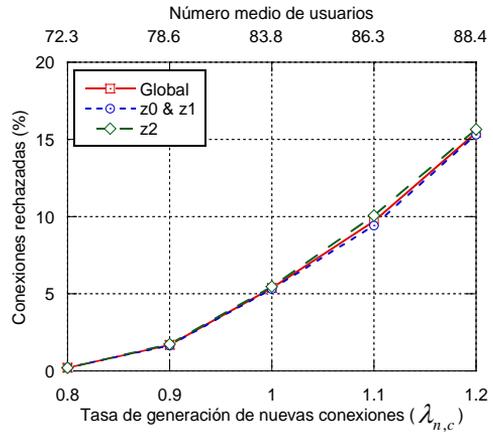
a1) Porcentaje de TUs descartados ($\varepsilon = 1$)



a2) Porcentaje de conexiones rechazadas ($\varepsilon = 1$)



b1) Porcentaje de TUs descartados ($\varepsilon = 2.5$)



b2) Porcentaje de conexiones rechazadas ($\varepsilon = 2.5$)

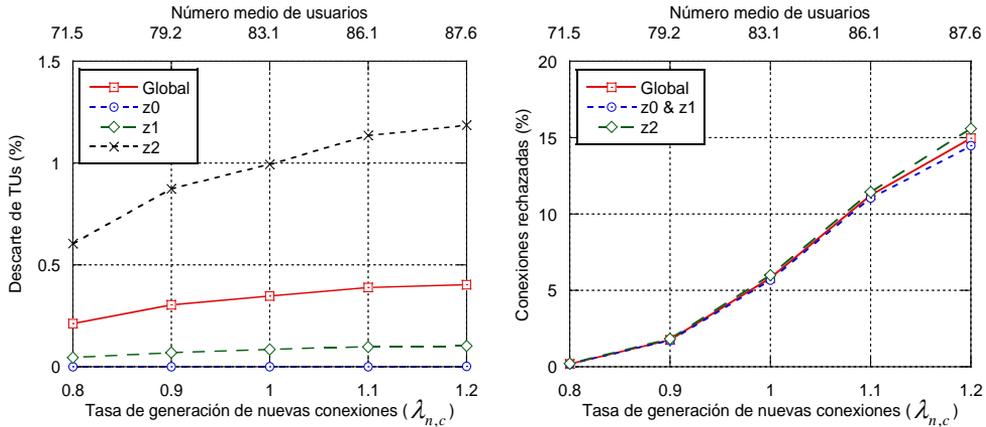
Figura 6.9: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Datos buffer (Modelo ON-OFF)

Las prestaciones obtenidas cuando se emplea el factor que considera los datos acumulados en los buffers son mejores que las obtenidas cuando se emplea el factor corrector que considera exclusivamente la satisfacción de la tasa requerida. Gracias a que el factor corrector considera los TUs que se van acumulando en los buffers de las conexiones de los usuarios, así como el tiempo restante para poder cursar ese tráfico retrasado, el factor es capaz de reaccionar cuando la celda comienza a congestionarse y los usuarios comienzan a no ser capaces de cursar todo su tráfico, incrementando las estimaciones del consumo de RBs. Esto conlleva el incremento del porcentaje de conexiones rechazadas, evitando que las prestaciones de los usuarios se vean demasiado degradadas, al aumentar la tasa de generación de nuevas conexiones.

6.8.1.4 Reparto completo de recursos ponderando las medidas con el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers y ajustando adaptativamente el margen de recursos (CS_med_pon_ep_adap)

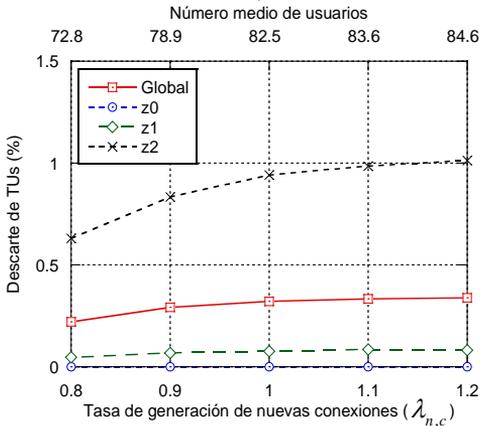
En los resultados analizados en el subapartado anterior para la estrategia CS_med_pon_ep aplicando el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers de los usuarios, se ha visto que un valor de $\varepsilon = 1$ es adecuado para que la estrategia de CAC proteja al sistema cuando se incrementa la tasa de generación de nuevas conexiones. Sin embargo, un valor de $\varepsilon = 2.5$ es más adecuado para minimizar el porcentaje de conexiones rechazadas cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada. Por lo tanto, con el objetivo de adaptar de forma dinámica el valor de ε se ha propuesto la estrategia CS_med_pon_ep_adap, cuyos resultados se muestran en la Figura 6.10. De igual forma que en la estrategia previa, los límites del factor corrector se han definido de la siguiente manera: $Cota_{min} = 1$ y $Cota_{max} = 1.25$.

Para ir ajustando ε_{adap} se emplea el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios con peores prestaciones dentro del sistema ($P_{desc}^{UES_peores_prest}$), y se han evaluado las prestaciones de la estrategia CS_med_pon_ep_adap para varios valores del porcentaje de usuarios que se seleccionan para obtener ese porcentaje de descarte de TUs: $P_{UES_peores_prest}^{selec}$. Para controlar cuando se incrementa el valor de ε_{adap} y cuando se reduce, se emplean los siguientes umbrales sobre el factor de descarte ($Factor_{desc}$): $TH_{min} = 0.5$ y $TH_{max} = 0.75$. $Factor_{desc}$ se obtiene mediante el cociente entre $P_{desc}^{UES_peores_prest}$ y $Cota_{desc}^{obj}$. Por lo tanto, cuando $Factor_{desc}$ se aproxima a 1 quiere decir que el porcentaje de descarte de TUs de los UEs con peores prestaciones se aproxima a la cota de descarte objetivo del 1%, y el sistema puede comenzar a no disponer de RBs suficiente para satisfacer los requisitos de los UEs.

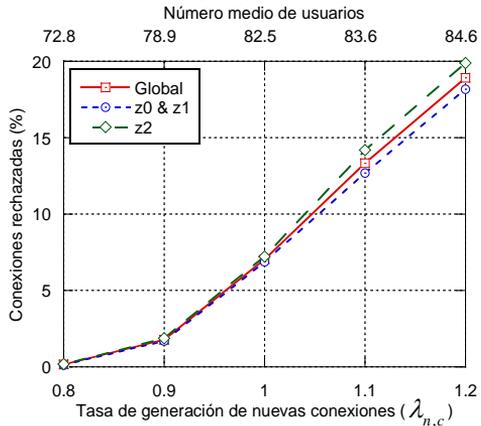


a1) Porcentaje de TUs descartados ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 5\%$)

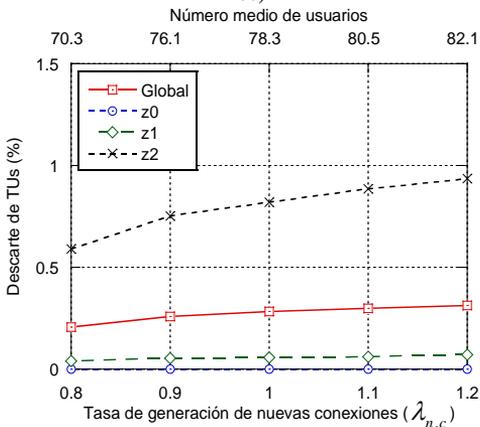
a2) Porcentaje de conexiones rechazadas ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 5\%$)



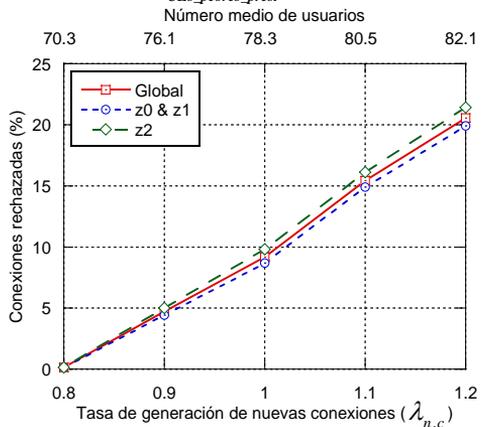
b1) Porcentaje de TUs descartados ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 4\%$)



b2) Porcentaje de conexiones rechazadas ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 4\%$)



c1) Porcentaje de TUs descartados ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 3\%$)



c2) Porcentaje de conexiones rechazadas ($P_{UES_peores_prest}^{selec} = 3\%$)

Figura 6.10: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep_adap - Datos buffer (Modelo ON-OFF)

Teniendo en cuenta los resultados observados para la estrategia CS_med_pon_ep se ha definido $\varepsilon_{max} = 2.5$ RBs ya que este valor permite obtener porcentajes de rechazo de conexiones bajos cuando la tasa de generación de conexiones no es muy elevada. El valor mínimo se define como $\varepsilon_{min} = 0$. El procedimiento de adaptación de ε_{adap} se lleva a cabo cada 45 segundos, que equivale a la mitad del tiempo medio que los usuarios permanecen activos en el sistema (μ_{activo}^{UE}). Los pasos con los que se va adaptando el valor del margen de recursos se han definido de la siguiente forma: $\Delta_{incr} = 0.25$ y $\Delta_{dism} = 0.5$. Al considerar un Δ_{dism} superior a Δ_{incr} , y junto con la definición de las medidas consecutivas que se garantiza un factor de descarte inferior al umbral TH_{min} , se persigue que ε_{adap} solo se incremente cuando se está seguro de que la red está satisfaciendo los requisitos de QoS de los usuarios, mientras que en cuanto se detecta que el sistema está empezando a congestionarse, la disminución de ε_{adap} sea mucho más rápida.

Si se analiza en primer lugar los resultados obtenidos cuando se selecciona al 5% de los usuarios con peores prestaciones del sistema para realizar el ajuste de ε_{adap} (Figura 6.10(a1) y Figura 6.10(a2)), se puede observar que se obtienen unos resultados similares a los obtenidos por la estrategia previa CS_med_pon_ep, cuando $\varepsilon = 2.5$. Por lo tanto, se consigue mantener un porcentaje de conexiones rechazadas bajo para las situaciones en las que el número de usuarios que intentan acceder a la celda no es muy elevado, pero no se consigue proporcionar suficiente protección a medida que se aumenta el número de usuarios que intentan acceder al sistema. Esto es debido a que el porcentaje de usuarios con peores prestaciones seleccionados para el ajuste de ε_{adap} es demasiado elevado, y la propuesta no reacciona con la suficiente rapidez ante la degradación de prestaciones de los usuarios, no siendo capaz de reducir el valor de ε_{adap} lo suficiente para evitar que se supere la cota objetivo de descarte de TUs.

Si se reduce el porcentaje de los usuarios con peores prestaciones que se seleccionan para el ajuste de ε_{adap} al 4% (Figura 6.10(b1) y Figura 6.10(b2)), se observa que se consigue mantener un porcentaje de conexiones rechazadas bajo para las situaciones en las que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada, gracias a que la propuesta mantiene el valor del margen de recursos al máximo ($\varepsilon_{max} = 2.5$). Además, a medida que se aumenta la tasa de generación de nuevas conexiones, el procedimiento de ajuste de ε_{adap} es capaz de reaccionar con la suficiente rapidez para disminuir el valor del margen de recursos y, así, aumentar el porcentaje de rechazo de conexiones, evitando la degradación de prestaciones de los usuarios. Por lo tanto, definiendo $P_{UES_peores_prest}^{selec} = 4\%$ se consigue que el porcentaje de TUs descartados no supere la cota objetivo, proporcionando una gran seguridad y garantizando que los

usuarios que se admiten satisfacen los requisitos de QoS. Además, también se consigue minimizar el porcentaje de conexiones rechazadas cuando el número de usuarios que intentan acceder al sistema no es demasiado alto.

Finalmente, como puede observarse en la Figura 6.10(c1) y la Figura 6.10(c2), si se reduce más el porcentaje de usuarios con las peores prestaciones que se seleccionan para el ajuste de ε_{adapt} , $P_{UES_peores_prest}^{selec} = 3\%$, se proporciona una mayor protección cuando el número de usuarios que intenta acceder al sistema aumenta, pero a costa de aumentar el porcentaje de conexiones rechazadas cuando el número de usuarios que intenta acceder a las celdas no es muy elevado, disminuyendo la eficiencia del sistema.

6.8.2 Evaluación y comparación de prestaciones considerando un modelo de tráfico de video

En este subapartado se evalúan las prestaciones de las estrategias de CAC basadas en un reparto completo de recursos más representativas, empleando un modelo de tráfico de transmisión de video en tiempo real, utilizado por el 3GPP [76], en lugar de emplear un modelo de tráfico abstracto como es el modelo ON-OFF. En primer lugar, se evalúa la estrategia básica CS_med, para posteriormente evaluar las estrategias más avanzadas en las que se añade el margen de recursos y el factor corrector para ponderar las medidas de consumo de RBs de los usuarios. La Figura 6.11 recoge las principales características del modelo de tráfico de video, visto desde el punto de vista de la macrocelda para el enlace DL.

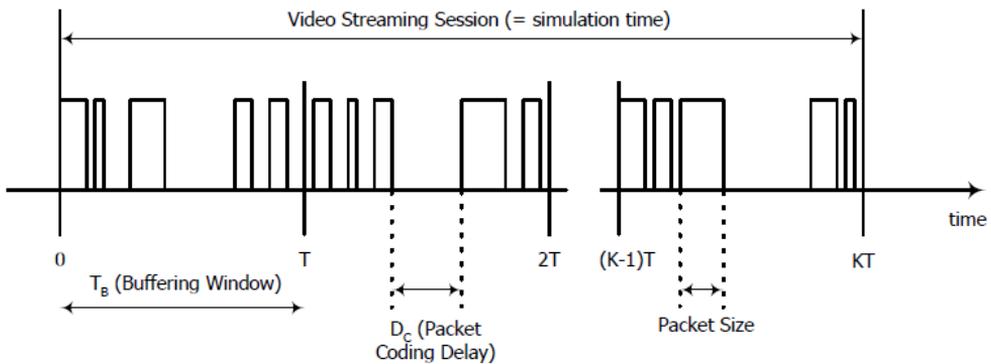


Figura 6.11: Modelo de tráfico de transmisión de video [76]

En el modelo de tráfico de transmisión de video considerado se genera una trama de video cada intervalo fijo T . Durante la duración de cada trama de video se genera un número fijo de paquetes o slices. El tamaño de cada paquete se obtiene mediante una distribución de Pareto truncada, con valor máximo m_s y media μ_s . El tiempo de llegada entre paquetes consecutivos de una trama de

video se modela mediante una distribución de Pareto truncada, con valor máximo m_t y media μ_t . La Tabla 6.10 recopila los valores concretos empleados en las simulaciones mostradas en este subapartado para el modelo de tráfico de video. De la misma forma que el modelo de tráfico ON-OFF, el modelo de tráfico de transmisión de video está limitado por el retardo, es decir, que cuando un paquete lleva almacenado en los buffers de la conexión de un usuario D_{max}^u subtramas, dicho paquete es descartado.

Parámetro	Valor
Tiempo de llegada entre el inicio de cada trama de video (T)	100 ms
Número de paquetes (slices) en cada trama de video	8
Tamaño de paquete	Distribución de Pareto truncada ($m_s = 250$ bytes y $\mu_s = 50$ bytes)
Tiempo de llegada entre paquetes en una trama de video	Distribución de Pareto truncada ($m_t = 12.5$ ms y $\mu_t = 6$ ms)
D_{max}^u	50 ms

Tabla 6.10: Parámetros del modelo de tráfico de video

Los resultados que se presentan en este subapartado se han obtenido empleando las mismas condiciones de simulación que las empleadas en el resto del capítulo, y que han sido explicadas en el subapartado 6.6.1 (en la Tabla 6.5 se recogen los parámetros generales de simulación), con la única diferencia del modelo de tráfico aplicado. Respecto a las ventanas deslizantes en las que se almacenan las medidas de los recursos consumidos por cada usuario, como la duración de una trama de video es de 100 ms (100 subtramas), se mantiene el periodo de observación de 840 subtramas, empleado también para el modelo de tráfico ON-OFF. De esta forma, se disponen de medidas del consumo del usuario durante varias tramas completas de video, permitiendo obtener un promedio que represente realmente la cantidad de RBs que está consumiendo el usuario. Por lo tanto, se sigue empleando la ecuación (6.29) para obtener el valor del consumo de RBs promedio para cada usuario ($NRB_{cons}^u(t)$), considerando un primer bloque con las medidas de las 120 subtramas más recientes (\bar{V}_{rec}^u) y un segundo bloque con las medidas de las 720 subtramas más antiguas (\bar{V}_{ant}^u), y definiendo $\beta = 0.25$.

De la misma forma que en las simulaciones llevadas a cabo con el modelo de tráfico ON-OFF, se ha variado la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$). En media, el modelo de tráfico de video genera una menor tasa de datos que el

modelo de tráfico ON-OFF. Es por ello que en las simulaciones presentadas para el modelo de tráfico de video se han considerado valores más altos de $\lambda_{n,c}$, variando desde 1.3 nuevas conexiones por segundo hasta 2.1 nuevas conexiones por segundo. Para facilitar la visualización de los resultados en las figuras se sigue representando únicamente la tasa de generación de nuevas conexiones ($\lambda_{n,c}$), pero merece la pena recordar que la tasa de llegada de conexiones a una celda incluye también la tasa de llegada de conexiones que realizan handover desde celdas vecinas.

Como el modelo de tráfico de video también es un modelo con restricciones de retardo, la evaluación de la satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios se continúa realizando en base a la tasa de descarte de TUs, considerándose igualmente una cota de descarte de TUs objetivo ($Cota_{desc}^{obj}$) del 1%. Para calcular la tasa media requerida por un usuario que cursa el modelo de tráfico de transmisión de video (T_{req}^{med}) se emplea la ecuación (6.38), teniendo en cuenta el número fijo de paquetes que se generan en cada trama de video, así como su tamaño medio. Esta T_{req}^{med} es la que se emplea para estimar la demanda de recursos del usuario que intenta acceder a la celda empleando las eficiencias por RB obtenidas offline.

$$T_{req}^{med} = \frac{8 \cdot \mu_s}{T} \quad (6.38)$$

6.8.2.1 Reparto completo de recursos con medidas reales del consumo de recursos (CS_med)

En la Figura 6.12 se representan los resultados obtenidos para la estrategia CS_med, cuando se emplea el modelo de tráfico de transmisión de video. Como se trata de una estrategia basada en un reparto completo de los recursos frecuenciales, se considera que un usuario, tanto interior como exterior, puede acceder a todos los recursos de la subbanda interior de la celda y a los recursos de la subbanda exterior de su sector. Merece la pena recordar que el porcentaje de conexiones rechazadas representado considera, tanto las conexiones nuevas que intentan acceder al sistema por primera vez, como las conexiones que intentan realizar un handover a una celda vecina.

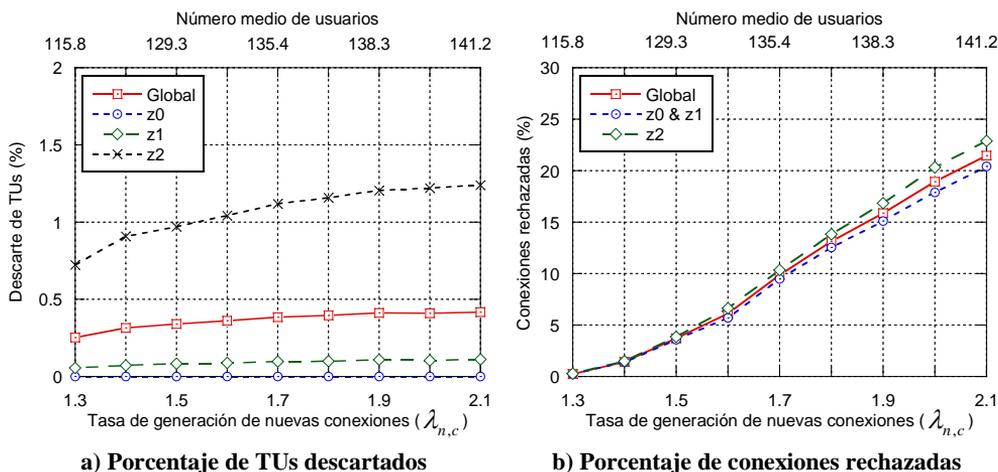


Figura 6.12: Resultados para la estrategia CS_med (Modelo Video)

En la Figura 6.12(a) se representa el porcentaje de descarte de TUs. Se puede observar que, a diferencia de los resultados obtenidos cuando se emplea el modelo de tráfico ON-OFF (Figura 6.6), para el modelo de tráfico de video la estimación del consumo de recursos de los usuarios actualmente admitidos en base a las medidas de consumo almacenadas para cada usuario proporciona una protección significativa a medida que se incrementa el número de usuarios que intentan acceder al sistema. Esto es debido a que como la fuente generadora de tráfico genera varios paquetes individuales cada trama de video, ocurre con mayor probabilidad que en los buffers de las conexiones de los usuarios se quede almacenado un único TU, el último TU de los paquetes, incrementando el uso del MCS más bajo del sistema. Al darse un mayor uso del MCS más bajo del sistema, que ocupa un RB para enviar un único TU, se favorece que a medida que aumenta el número de usuarios admitidos en el sistema, y antes de que las prestaciones se degraden en exceso, los usuarios actualmente admitidos ya estén empleando todos los recursos disponibles en la mayoría de subtramas, provocando que la política de admisión rechace el acceso de nuevos usuarios a la celda. Este hecho favorece la protección de las prestaciones de los usuarios ya admitidos, aunque se incremente la tasa de generación de nuevas conexiones. No obstante, la protección proporcionada no es suficiente y se supera la cota objetivo de descarte de TUs del 1%.

6.8.2.2 *Reparto completo de recursos ponderando las medidas con el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers y añadiendo un margen al total de recursos disponibles (CS_med_pon_ep)*

Como se ha visto en los resultados obtenidos para el modelo de tráfico ON-OFF, el margen de recursos ε permite reducir el porcentaje de rechazo de conexiones cuando el número de UEs que intentan acceder al sistema no es muy elevado. Sin embargo, a medida que se incrementa la tasa de generación de nuevas conexiones se degradan las prestaciones del sistema al reducirse también el porcentaje de conexiones rechazadas. Debido a esto, en la estrategia CS_med_pon_ep se aplica un factor corrector para ponderar las estimaciones del consumo de RBs de los usuarios actualmente conectados. Se ha visto que el factor corrector que considera los datos acumulados en los buffers refleja de forma más precisa el grado de satisfacción de los requisitos de QoS de los UEs, que el factor que considera exclusivamente la satisfacción de la tasa requerida. Por ello, en la Figura 6.13 se representan únicamente los resultados obtenidos para la estrategia CS_med_pon_ep cuando se emplea el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers.

Se han considerado los mismos valores del margen de recursos que los aplicados en el subapartado anterior para el modelo de tráfico ON-OFF, representando en la Figura 6.13(a1) y la Figura 6.13(a2) los resultados para $\varepsilon = 1$, y en la Figura 6.13(b1) y la Figura 6.13(b2) los resultados para $\varepsilon = 2.5$. Respecto a los límites del factor corrector, y de la misma forma que en el subapartado anterior, se ha considerado $Cota_{min} = 1$ y $Cota_{max} = 1.25$.

Si en primer lugar se analizan los resultados cuando $\varepsilon = 1$, se puede observar que se proporciona protección al sistema cuando la tasa de generación de nuevas conexiones aumenta, sobrepasando solo ligeramente la cota objetivo de descarte de TUs. Sin embargo, el porcentaje de conexiones rechazadas es alto cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es demasiado elevada, pudiéndose haber permitido el acceso a un mayor número de usuarios sin superar la cota objetivo de descarte del 1%. Si se incrementa el valor del margen de recursos ($\varepsilon = 2.5$), se reduce el porcentaje de conexiones rechazadas cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es demasiado alta, pero, como contrapartida, la estrategia de CAC no proporciona protección cuando la tasa de generación de nuevas conexiones aumenta, provocando que las prestaciones del sistema se degraden.

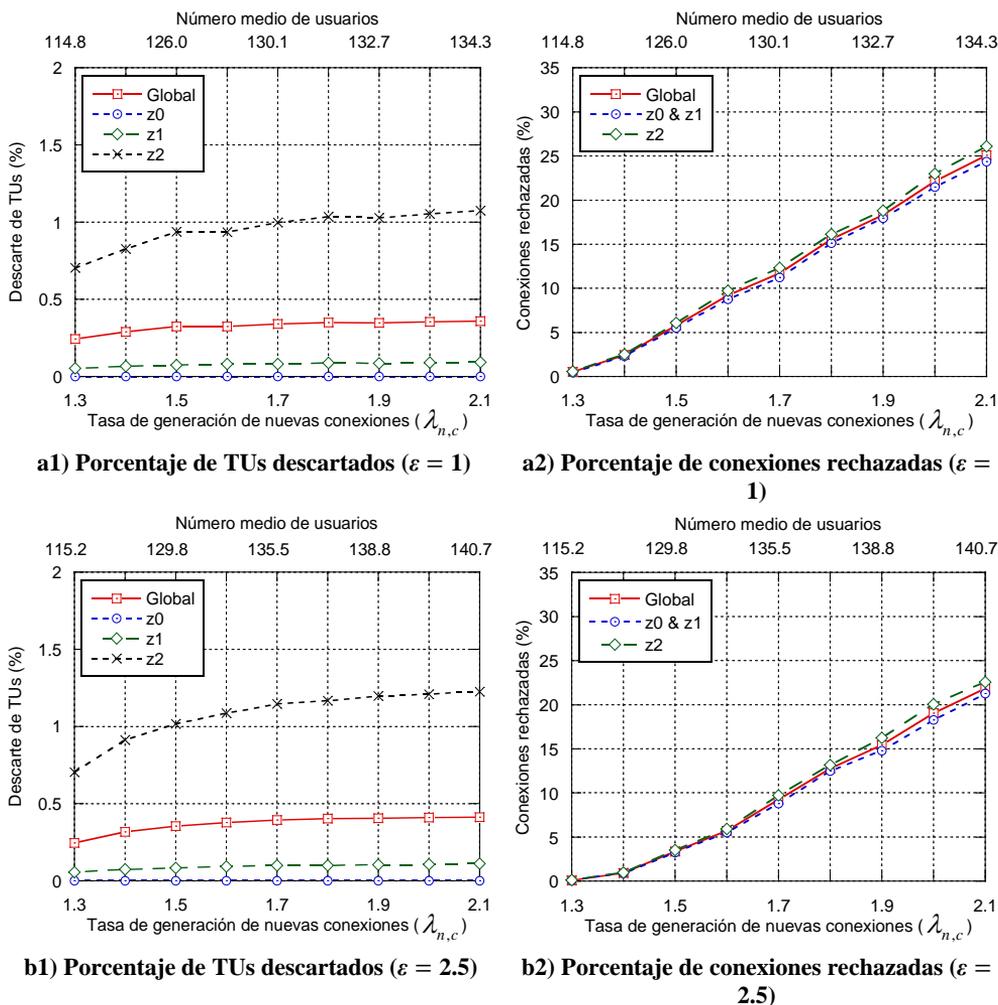


Figura 6.13: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep – Datos buffer (Modelo Video)

De la misma forma que lo observado cuando se emplea el modelo de tráfico ON-OFF, gracias a que el factor corrector considera los TUs que se van acumulando en los buffers de las conexiones de los usuarios, así como el tiempo restante para poder cursar ese tráfico retrasado, el factor es capaz de reaccionar cuando la celda comienza a congestionarse y los usuarios comienzan a no ser capaces de cursar todo su tráfico, incrementando las estimaciones del consumo de RBs. No obstante, un valor alto del margen de recursos ($\epsilon = 2.5$) provoca que el mecanismo de CAC no proporcione la protección suficiente, mientras que un valor más bajo ($\epsilon = 1$) conlleva que se rechacen demasiadas conexiones cuando el número de UEs que intentan acceder al sistema no es muy elevado. Es por ello que se ha propuesto la estrategia CS_med_pon_ep_adap para adaptar de forma

dinámica el valor de ε , considerando el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios con peores prestaciones como parámetro para determinar la satisfacción de los requisitos de QoS.

6.8.2.3 Reparto completo de recursos ponderando las medidas con el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers y ajustando adaptativamente el margen de recursos (CS_med_pon_ep_adap)

En este subapartado se representan los resultados obtenidos para la estrategia CS_med_pon_ep_adap empleando el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers de las conexiones de los usuarios. Se han considerado los mismos valores para los parámetros disponibles en esta estrategia que los considerados en el subapartado anterior para el modelo de tráfico ON-OFF. Por lo tanto, los límites del factor corrector se han definido de la siguiente manera: $Cota_{min} = 1$ y $Cota_{max} = 1.25$. Respecto al ajuste de ε_{adap} , el procedimiento de adaptación se continúa llevando a cabo cada 45 segundos, considerándose los mismos pasos de adaptación ($\Delta_{incr} = 0.25$ y $\Delta_{dism} = 0.5$) y los mismos valores mínimo y máximo ($\varepsilon_{min} = 0$ y $\varepsilon_{max} = 2.5$). En la Figura 6.14 se representan los resultados para varios valores del porcentaje de usuarios que se seleccionan para obtener el porcentaje de descarte de TUs de los usuarios con peores prestaciones: $P_{UES_peores_prest}^{selec}$. Finalmente, para controlar cuando se incrementa el valor de ε_{adap} y cuando se reduce, se siguen empleando los siguientes umbrales sobre el factor de descarte ($Factor_{desc}$): $TH_{min} = 0.5$ y $TH_{max} = 0.75$.

6.8 Resultados de las estrategias avanzadas de CAC

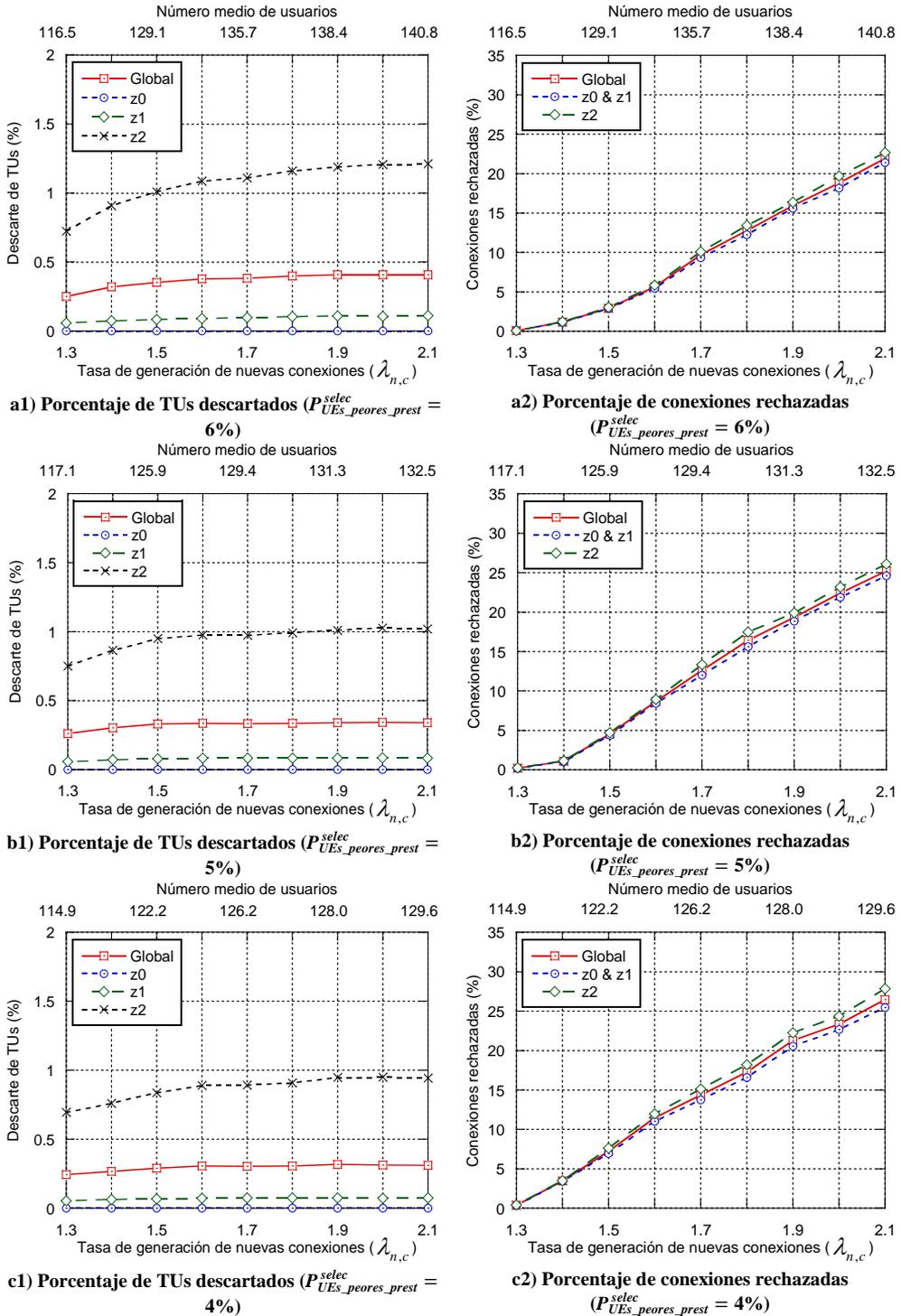


Figura 6.14: Resultados para la estrategia CS_med_pon_ep_adap - Datos buffer (Modelo Video)

En la Figura 6.14(a1) y la Figura 6.14(a2) se representan los resultados cuando se selecciona el 6% de los usuarios con peores prestaciones del sistema para adaptar el valor de ϵ_{adapt} . Se puede observar que se consigue obtener un porcentaje de conexiones rechazadas bajo cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada. Sin embargo, la estrategia de CAC no consigue proporcionar suficiente protección y las prestaciones del sistema se degradan al aumentar la tasa de generación de nuevas conexiones. Si se reduce el porcentaje de usuarios con peores prestaciones que se seleccionan para el procedimiento de adaptación de ϵ_{adapt} al 5% (Figura 6.14(b1) y Figura 6.14(b2)), se mantiene un porcentaje de conexiones rechazadas bajo, cuando el número de usuarios que intentan acceder al sistema no es muy elevado. Y, al mismo tiempo, la estrategia de CAC proporciona protección ante el incremento del número de usuarios que intentan acceder al sistema, satisfaciendo la tasa objetivo de descarte de TUs del 1%. Si se continúa reduciendo el porcentaje de usuarios con peores prestaciones que se seleccionan para el procedimiento de adaptación de ϵ_{adapt} (Figura 6.14(c1) y Figura 6.14(c2)), la estrategia proporciona una mayor protección ante el incremento de la tasa de generación de nuevas conexiones, pero a costa de aumentar excesivamente el porcentaje de conexiones rechazadas cuando la tasa de generación de nuevas conexiones no es demasiado elevada. Por lo tanto, se obtienen conclusiones similares a las comentadas para el modelo de tráfico ON-OFF, y las mejores prestaciones se obtienen cuando $P_{UEs_peores_prest}^{selec} = 5\%$, proporcionando una gran seguridad y garantizando que los usuarios que se admiten satisfacen los requisitos de QoS.

6.9 Conclusiones

En este capítulo se han propuesto varias estrategias de CAC con el objetivo de garantizar unas prestaciones aceptables a todos los usuarios a los que se admite, al mismo tiempo que se busca maximizar la eficiencia del sistema tratando de rechazar nuevas conexiones solo cuando es realmente necesario. En términos generales, los mecanismos de CAC suelen englobar dos aspectos principales, como son el cálculo de la capacidad de la celda y el consumo de recursos de los usuarios, y la política de admisión que define las condiciones que deben darse para que una nueva conexión sea aceptada. Respecto al primer aspecto, los resultados muestran que el uso de las medidas del consumo real de los usuarios durante las últimas subtramas permite estimar de forma más realista el consumo acumulado de la celda, que estrategias basadas en una estimación teórica mediante la aplicación de eficiencias promedio. Esto es debido a que las medidas del consumo de los usuarios reflejan fielmente cómo va repartiéndose los recursos frecuenciales el scheduler, qué condiciones de canal están observando los usuarios, etc.

Respecto a las políticas de admisión, en primer lugar, se han evaluado y comparado dos estrategias extendidas en la literatura como son la partición completa (CP) y el reparto completo (CS). En las estrategias basadas en una partición completa se considera que los usuarios solo acceden a los recursos frecuenciales destinados a la zona de la celda a la que pertenecen. Es decir, se considera que los usuarios interiores solo acceden a los recursos de la subbanda interior, mientras que los usuarios exteriores solo acceden a la subbanda exterior. Este tipo de estrategias de partición completa son bastante rígidas, y en los resultados se ha visto que proporcionan porcentajes de rechazo de conexiones bastante altos. Además, como el esquema FFR_{opa} considera una sectorización estricta en la subbanda exterior, estas estrategias provocan una tasa de conexiones rechazadas en las zonas exteriores de las celdas mucho más elevada que en las zonas interiores.

Por otro lado, en las estrategias basadas en un reparto completo de los recursos se considera que los usuarios pueden acceder a los recursos frecuenciales de ambas subbandas, teniendo en cuenta la flexibilidad del esquema de asignación de recursos empleado. Esto permite que las estrategias basadas en un reparto completo proporcionen una tasa de rechazo de conexiones más baja que las estrategias basadas en una partición completa, además de garantizar un tratamiento más similar a conexiones interiores y exteriores, mejorando la eficiencia del mecanismo de CAC. Por lo tanto, la estrategia CS_{med} es la que mejores prestaciones ofrece.

Sobre la estrategia básica CS_{med} se han propuesto varias estrategias en las que se han introducido variaciones con el objetivo de mejorar sus prestaciones. Por un lado, en la estrategia CS_{med_ep} se ha aplicado un margen al total de recursos disponibles, consiguiendo reducir el porcentaje de conexiones rechazadas para las situaciones en las que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada. Sin embargo, esta estrategia no es capaz de proteger al sistema a medida que el número de usuarios que intentan acceder al sistema aumenta, provocando una degradación de las prestaciones de las conexiones admitidas en el sistema. Esto se debe a que, cuando la celda no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios, las medidas de los recursos consumidos no representan fielmente los recursos que necesitan los usuarios para satisfacer sus requisitos. Por lo tanto, se ha propuesto la estrategia CS_{med_pon_ep}, en la cual las medidas de consumo de RBs de los usuarios se ponderan por un factor corrector que considera el grado de satisfacción de los requisitos de QoS.

Se han propuesto dos factores correctores, basándose el primero de ellos en la satisfacción de la tasa requerida de los usuarios. Sin embargo, este factor no proporciona suficiente protección cuando se incrementa la tasa de generación de

nuevas conexiones, degradándose las prestaciones del sistema. Los modelos de tráfico empleados en este capítulo tienen restricciones de retardo, y se ha considerado una cota de descarte de TUs objetivo del 1%, la cual no reduce significativamente la satisfacción de la tasa requerida. Por lo tanto, este factor no refleja adecuadamente el grado de satisfacción de los requisitos de QoS de los usuarios, y en el segundo factor propuesto se considera de forma directa los paquetes de datos que se van acumulando en los buffers de las conexiones, mediante la estimación de la tasa adicional que el usuario debería cursar para ser capaz de transmitir los paquetes almacenados en los buffers, sin que estos sean descartados por superar la cota máxima de retardo.

El factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers de las conexiones es capaz de reaccionar cuando la celda comienza a congestionarse y los usuarios comienzan a no ser capaces de cursar todo su tráfico, incrementando las estimaciones del consumo de RBs, e incrementando de esta forma la tasa de conexiones rechazadas. Los resultados muestran que considerar un margen de recursos de 1 RB ofrece un gran grado de protección, evitando que las prestaciones de los usuarios se degraden al incrementarse el número de UEs que intentan acceder al sistema. Sin embargo, considerar un valor más alto para el margen de recursos (2.5 RBs) permite minimizar el porcentaje de conexiones rechazadas cuando el número de UEs que intentan acceder al sistema no es muy elevado, a costa de reducir la protección del sistema a medida que el número de UEs que tratan de acceder a la red aumenta. Teniendo en cuenta las limitaciones de un margen de recursos fijo, en la última estrategia propuesta (CS_med_pon_ep_adap) se propone un procedimiento de adaptación del margen aplicado al total de recursos disponibles, que tiene en cuenta el porcentaje de descarte de los UEs con peores prestaciones del sistema. Los resultados muestran que seleccionando un porcentaje adecuado de los UEs con peores prestaciones que se consideran en el proceso de adaptación, la estrategia CS_med_pon_ep_adap proporciona un gran nivel de protección a medida que el número de UEs que intentan acceder al sistema aumenta, al mismo tiempo que mantiene tasas de rechazo de conexiones bajas cuando el número de UEs que tratan de acceder a la red no es muy elevado.

Capítulo 7

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

7.1 Conclusiones

Esta tesis se enmarca en el contexto de redes móviles de banda ancha, en las que los usuarios demandan tasas de datos y requisitos de QoS cada vez más exigentes. Para satisfacer estas demandas se hace necesario proporcionar un servicio ubicuo de calidad, con el que los usuarios puedan disfrutar de una gran experiencia, independientemente de la ubicación en la que se encuentren. Con este objetivo, las redes persiguen un reuso frecuencial unidad, de tal modo que todas las celdas de la red emplean el mismo ancho de banda. Sin embargo, el reuso agresivo genera una fuerte interferencia, y aunque se consideren mecanismos de control de la interferencia que permitan reducir estos niveles, el objetivo de proporcionar un servicio ubicuo de calidad sigue quedando limitado, especialmente en áreas con alta concentración de usuarios, en zonas de sombra donde el nivel de señal útil recibido es muy bajo debido al entorno y en las zonas exteriores de las celdas. Es por ello que una de las soluciones propuestas, y que es la que se ha considerado en esta tesis, es el despliegue de redes heterogéneas. Aunque la ganancia proporcionada por el despliegue de nodos de baja potencia es indudable, es necesario solventar los retos asociados a estos despliegues, siendo dos de los principales la gestión de la interferencia y el criterio de selección de nodo.

Se ha comenzado evaluando el potencial de los despliegues heterogéneos con picoceldas, proponiéndose varios esquemas de coordinación de

interferencias. La mayoría de propuestas encontradas en la literatura no consideran un esquema de ICIC entre eNBs, y muchas de ellas reducen los recursos disponibles en los eNBs para proporcionar recursos con menores niveles de interferencia a las picoceldas. En esta tesis, se ha aprovechado la ordenación en la asignación frecuencial de la subbanda interior del esquema de ICIC FFR_o para coordinar los recursos que son asignados por la macrocelda en la zona donde se encuentra la picocelda, con los recursos que son asignados por la picocelda. Además, se ha evaluado el criterio de selección de nodo CRE que permite incrementar el número de usuarios que son servidos por las picoceldas, para así maximizar los beneficios proporcionados por el despliegue heterogéneo.

Después se ha continuado el análisis de las redes heterogéneas, pero centrándose en el despliegue de relays. Como el enlace backhaul de los relays utiliza la interfaz aire LTE, la gestión de recursos se complica todavía más, y es necesario adoptar esquemas de reuso frecuencial dentro de las celdas para compensar el overhead introducido por los enlaces backhaul. Sin embargo, las estrategias existentes en la literatura tienden a dejar fuera del análisis a los enlaces backhaul, y en la mayoría de casos se proponen esquemas de reuso frecuencial poco eficientes. Por ello, en este trabajo se han propuesto diferentes alternativas de coordinación de interferencias que consideran todos los enlaces, y que buscan maximizar el reuso frecuencial, pero siempre coordinando los recursos empleados por macroceldas y relays para garantizar buenas condiciones de interferencia a los usuarios, incrementando significativamente la capacidad total de la red. También se ha evaluado el criterio de selección de nodo CRE, que sigue siendo interesante para aumentar la cantidad de usuarios que permanecen conectados a los relays.

Partiendo de las estrategias estáticas de gestión de recursos que se han propuesto para los despliegues con relays, se ha dado un paso más y se han considerado condiciones cambiantes y heterogéneas de carga de tráfico. Para lidiar con estas condiciones tan variables, es necesario adaptar de forma dinámica los recursos que se asignan a cada enlace, pero también es necesario aplicar un criterio de selección de nodo que tenga en cuenta cómo se distribuye la carga en la red. Es complicado encontrar propuestas en la literatura que aborden ambos aspectos de forma conjunta, y es por ello que se ha propuesto un algoritmo que combina por un lado una distribución dinámica de los recursos frecuenciales entre los diferentes nodos y enlaces para adaptarse a las condiciones cambiantes de demanda de tráfico y, por otro lado, un criterio de selección de nodo que considera la distribución de carga de la red, con el objetivo de seleccionar el nodo que permite optimizar el consumo de recursos, al mismo tiempo que se trata de garantizar que se satisfacen los requisitos de QoS de los usuarios.

Además de considerar soluciones para adaptar el esquema de coordinación de interferencias y reparto de recursos, también se requiere considerar otro mecanismo interrelacionado como es el control de admisión, que es el encargado de evaluar la conveniencia de aceptar una nueva conexión que requiere recursos de la red. No debe olvidarse que los recursos con los que cuenta la red son limitados, por lo que es necesario calcular la capacidad de cada nodo y el consumo de recursos de todos los usuarios. Sin embargo, esta estimación del consumo de los usuarios no es trivial, ya que su consumo depende de su distribución dentro de la celda, de su movilidad, del comportamiento de las estrategias de gestión de recursos radio, etc., y generalmente se consideran bastantes simplificaciones en las propuestas existentes que pueden comprometer la eficiencia del mecanismo de CAC. En esta tesis se han propuesto diferentes alternativas para estimar el consumo de recursos de los usuarios admitidos en el sistema de forma más realista, siendo las que se basan en las medidas del consumo real de los usuarios las que mejor reflejan el consumo acumulado de las celdas. Aplicando estas estimaciones del consumo de recursos se han propuesto varias políticas de admisión, y se ha visto que la política que adapta de forma dinámica sus parámetros es la que mejores prestaciones proporciona.

Todas las propuestas presentadas en esta tesis se han evaluado mediante un simulador de redes móviles desarrollado en C++ para este fin. Este simulador permite modelar de forma realista redes móviles, incluyendo todos los bloques que son relevantes para la gestión de recursos radio en 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. Gracias a este simulador se han podido analizar en detalle las prestaciones de las diferentes estrategias que se han ido contemplando a lo largo de la tesis, facilitando el planteamiento de las soluciones propuestas en este trabajo.

Las conclusiones concretas de la tesis pueden desglosarse en los dos siguientes bloques:

7.1.1 Coordinación de interferencias y selección de nodo en despliegues heterogéneos

Se ha comenzado analizando varios esquemas de ICIC para despliegues de picoceldas, tomando como referencia los esquemas FFR y FFR_{opa} aplicados a nivel de macrocelda. Gracias a que en el esquema FFR_{opa} la subbanda interior se divide en tres partes, cada una de las cuales se preasigna a un sector, se consigue reducir notablemente la variabilidad de la interferencia cross-layer que sufren los pUEs, incrementándose de forma notable el número de UEs a los que es capaz de proporcionar servicio cada picocelda frente al esquema FFR. Los resultados también han mostrado que incrementar la disponibilidad de RBs en

las picoceldas proporciona una notable ganancia de prestaciones, ya que las picoceldas aprovechan mejor la diversidad multicanal y multiusuario, compensando la degradación debida al incremento del reuso frecuencial. Además, también se ha comprobado que el incremento del número de RBs disponibles en las picoceldas no tiene un impacto significativo en las prestaciones de los mUEs, gracias a que la potencia de transmisión de las picoceldas es baja. Por lo tanto, gracias a considerar como esquema de ICIC el esquema FFR_o, y a coordinar los recursos que asigna la macrocelda en la zona que se despliega la picocelda con los asignados a la picocelda, no es necesario dejar sin utilizar recursos en los eNBs para dar soporte a la operativa de las picoceldas, como proponen algunas estrategias de la literatura.

Junto con los esquemas de ICIC se ha analizado la aplicación del criterio de selección de nodo CRE, que consiste en añadir un bias a la RSRP de la picoceldas. Se ha comprobado que es una propuesta eficiente para descargar parte de los UEs de los eNBs a las picoceldas, mejorando así la utilización de los RBs disponibles en las picoceldas. No obstante, como las picoceldas reutilizan los mismos recursos frecuenciales que son utilizados por los eNBs, es necesario escoger cuidadosamente el valor del bias considerado para no degradar en exceso las prestaciones de los pUEs que reciben niveles de RSRP superiores del eNB. Se ha comprobado que dos aspectos relevantes a la hora de decidir el valor del bias son la carga de la red y la posición de la picocelda respecto a su eNB.

Continuando con los despliegues heterogéneos se han propuesto y analizado diferentes esquemas de ICIC y asignación de recursos para despliegues con relays. La mayor parte de las propuestas de gestión de recursos radio existentes no tienen en cuenta los enlaces backhaul, siendo que estos pueden convertirse en el cuello de botella de los despliegues relays. Además, de forma general, se considera o bien un reparto ortogonal de recursos entre los diferentes enlaces, o un reuso frecuencial poco eficiente. En este trabajo se ha comprobado la necesidad de aplicar un reuso frecuencial dentro de los DeNBs, y la necesidad de coordinar los recursos asignados por los DeNBs en cada zona, que vienen determinados por el esquema de ICIC, con los que son utilizados para la operativa de los relays. Solo de esta forma se consigue compensar el overhead que suponen los enlaces backhaul y rentabilizar la ganancia potencial de los despliegues con relays, para ofrecer mejoras muy significativas respecto a las redes macrocelulares convencionales.

De los esquemas de ICIC propuestos para la estructura de trama convencional, los que se basan en SFR son los que han proporcionado las mejores prestaciones, gracias a que se planifican para los enlaces de acceso de los RNs aquellos recursos frecuenciales que no son potencialmente empleados por los sectores interferentes dominantes de los DeNBs. Posteriormente, y con el

objetivo de facilitar el reúso frecuencial entre RNs adyacentes y de permitir una mayor disponibilidad de recursos para los enlaces directos se ha propuesto una estructura de combinación de tramas, en la que, en cada subtrama, una parte de los RNs transmiten sus enlaces de acceso, mientras que la otra parte recibe sus enlaces backhaul. Los esquemas de ICIC que se han propuesto sobre esta estructura son los que han proporcionado los mejores resultados, gracias a incrementar la disponibilidad de recursos para los enlaces directos al repartir la transmisión de los enlaces backhaul entre ambos tipos de subtramas.

Se han propuesto esquemas de ICIC para dos configuraciones de despliegue de RNs, y se ha podido observar que es más beneficioso desplegar un mayor número de RNs en los DeNBs, que incrementar excesivamente los recursos frecuenciales reutilizados por cada RN para sus enlaces de acceso. La configuración de 4 RNs por sector gestiona mejor la interferencia co-layer entre RNs vecinos, permitiendo aumentar el throughput agregado de los rUEs, e incrementando de esta forma el throughput global del sistema. De forma adicional, también se ha considerado el despliegue de los RNs en la zona exterior de los DeNBs, consiguiéndose una mejora muy significativa del throughput agregado de los UEs de esta zona y proporcionando una distribución más equitativa del throughput agregado entre las diferentes zonas de las celdas. Finalmente, también se ha analizado la aplicación del criterio CRE para los despliegues con RNs. Los resultados muestran que la aplicación del bias permite aumentar el número de UEs que se benefician de las ventajas que proporciona el despliegue de RNs, aumentándose el throughput global del sistema.

La aplicación de esquemas de coordinación de interferencia fijos limita la eficiencia de la red ante condiciones de carga variables y heterogéneas. Es por ello que el siguiente paso de este trabajo ha sido proponer un algoritmo que combina, un esquema dinámico de RA-ICIC para adaptar la distribución de recursos frecuenciales, y un criterio de selección de nodo que tiene en cuenta la distribución de carga de la red, ya que es complicado encontrar una propuesta que considere ambos aspectos de forma conjunta. Los resultados muestran que el algoritmo es capaz de estimar la cantidad de recursos que debería recibir cada sector y cada RN, y realizar el reparto de forma eficiente satisfaciendo siempre las restricciones impuestas por el esquema de ICIC. En la mayoría de situaciones el esquema dinámico es capaz de satisfacer la distribución de recursos deseada para los enlaces directos y backhaul, obteniendo desviaciones asumibles para aquellas situaciones en las que no es capaz de satisfacer la distribución deseada. Gracias a las restricciones del esquema de ICIC se consigue adaptar la distribución de recursos frecuenciales, pero sin degradar excesivamente la calidad de las transmisiones de los enlaces directos y de los enlaces backhaul.

El criterio de selección de nodo propuesto, además de considerar el nivel de SINR que los UEs reciben de los diferentes nodos, también tiene en cuenta la distribución de carga, de tal forma que intenta conectar al UE al nodo del que recibe mejores niveles de SINR, pero comprobando que pueda garantizar sus requisitos de QoS. Este planteamiento permite mejorar las prestaciones de criterios que se basan exclusivamente en medidas de RSRP y de SINR ante condiciones heterogéneas de demanda de tráfico. De forma conjunta, se considera un proceso de redistribución de UEs que trata de alcanzar una distribución de carga más eficiente, con el objetivo de que todos los usuarios obtengan prestaciones similares. Especialmente relevantes son los resultados que se han obtenido para los escenarios en los que las demandas de tráfico de los RNs son elevadas, ya que el criterio propuesto es capaz de transferir parte de los UEs que se encuentran en los alrededores de los RNs a los DeNBs, reduciendo la demanda de tráfico de los RNs, y aprovechando la disponibilidad de recursos frecuenciales en los enlaces directos.

7.1.2 Control de admisión en redes macrocelulares

La última parte de este trabajo se ha centrado en el control de admisión, ya que los recursos frecuenciales disponibles en cada celda son limitados, y no siempre será posible dar servicio a todos los usuarios que lo requieran, debido a que podría sobrepasarse la capacidad de la celda, provocando una degradación de prestaciones de todas las conexiones en curso. Para estimar el consumo de los usuarios actualmente admitidos, se puede concluir que el uso de las medidas del consumo real de los usuarios durante las últimas subtramas permite estimar de forma más realista el consumo acumulado de la celda, ya que las medidas reflejan fielmente cómo va repartiendo los recursos frecuenciales el scheduler, qué condiciones de canal e interferencia están observando los usuarios, etc. Esta estrategia supone una notable mejora respecto a alternativas basadas en una estimación teórica mediante la aplicación de eficiencias promedio, especialmente si se asumen ciertas simplificaciones a la hora de obtener las eficiencias promedio, que es la estrategia más común que se encuentra en la literatura.

Respecto a las políticas de admisión, se ha comenzado analizando dos estrategias extendidas en la literatura como son CP y CS. Los resultados han mostrado que las estrategias basadas en un reparto completo de los recursos (CS) tienen en cuenta la flexibilidad del esquema de asignación de recursos empleado y proporcionan una tasa de rechazo de conexiones más baja que las estrategias basadas en una partición completa (CP), además de garantizar un tratamiento más similar a conexiones interiores y exteriores, mejorando la eficiencia del mecanismo de control de admisión.

Sobre la estrategia básica basada en CS se han propuesto varias políticas en las que se han introducido variaciones con el objetivo de mejorar las prestaciones. Por un lado, se ha propuesto añadir un margen al total de recursos frecuenciales disponibles, con el objetivo de minimizar la tasa de rechazo de conexiones en aquellas situaciones en las que la tasa de generación de nuevas conexiones no es muy elevada. Sin embargo, esta estrategia no protege al sistema a medida que el número de usuarios que intentan acceder al sistema aumenta. Esto se debe a que, cuando la celda no es capaz de satisfacer los requisitos de QoS de los usuarios, las medidas de los recursos consumidos no representan fielmente los recursos que realmente necesitan los usuarios para satisfacer sus requisitos. Por lo tanto, como siguiente paso se ha considerado un factor corrector que pondera las medidas de consumo de los usuarios y que tiene en cuenta el grado de satisfacción de los requisitos de QoS de cada UE. Se ha visto que el factor corrector que considera los datos almacenados en los buffers de las conexiones es capaz de reaccionar cuando la celda comienza a congestionarse y los usuarios comienzan a no ser capaces de cursar todo su tráfico, incrementando las estimaciones del consumo de RBs, e incrementando de esta forma la tasa de conexiones rechazadas.

Analizando los resultados se ha visto que considerar un valor fijo del margen que se añade al total de recursos disponibles no es eficiente ante diferentes tasas de llegada de nuevas conexiones. Por lo tanto, se ha propuesto un procedimiento de adaptación del margen aplicado al total de recursos disponibles, que tiene en cuenta el porcentaje de descarte de los UEs con peores prestaciones del sistema. Los resultados han mostrado que esta estrategia proporciona un gran nivel de protección a medida que el número de UEs que intentan acceder al sistema aumenta, al mismo tiempo que mantiene tasas de rechazo de conexiones bajas cuando el número de UEs que tratan de acceder a la red no es muy elevado. Por lo tanto, se puede concluir que las estrategias de CAC que consideran una adaptación de sus parámetros ante las condiciones de carga del sistema permiten mejorar la eficiencia frente a estrategias que consideran parámetros fijos.

7.2 Líneas futuras de investigación

De acuerdo con el contenido de esta tesis, se plantean las siguientes líneas de investigación:

7.2.1 Criterio de selección de nodo y reparto dinámico de recursos para despliegues heterogéneos con picoceldas

En esta tesis se ha analizado la aplicación del criterio CRE sobre despliegues heterogéneos con picoceldas. En los resultados se ha visto que es necesario

escoger un valor de bias adecuado para cada situación, siendo dos de los factores determinantes la carga del sistema y la distancia de la picocelda respecto a su eNB. En línea con el criterio de selección de nodo propuesto para despliegues con RNs (LBCSM), sería interesante estudiar cómo puede adaptarse este criterio a los despliegues con picoceldas, para obtener un criterio de selección de nodo que además de considerar las medidas de RSRP y SINR, también considere la distribución de carga, pudiendo redistribuir UEs de los nodos que soportan mayor carga a aquellos que se encuentran más liberados en ese momento.

De forma adicional, en esta tesis nos hemos centrado en el despliegue de una picocelda en cada eNB, sin embargo, también sería interesante estudiar y proponer esquemas dinámicos de ICIC y asignación de recursos que sean capaces de lidiar con un despliegue más intensivo de picoceldas. La aplicación conjunta de un criterio de selección de nodo que tenga en cuenta la carga de la red, y de un esquema dinámico de reparto de recursos, ofrecería una adaptación ante condiciones de demanda de tráfico variables y heterogéneas.

7.2.2 Estrategias de control de admisión para diferentes tipos de tráfico simultáneos

Las estrategias de control de admisión propuestas en este trabajo se han evaluado empleando un modelo de tráfico ON-OFF y un modelo de video, considerando para ambos modelos restricciones de retardo. Por lo tanto, resultaría de interés analizar otros modelos de tráfico y estudiar factores correctores que se adecuen a las características de cada tipo de tráfico, y sean capaces de detectar cuando los usuarios no están satisfaciendo sus requisitos de QoS, para así ponderar las medidas de consumo de RBs de los usuarios. Además, también sería necesario tener en cuenta las características de los nuevos modelos de tráfico para el procedimiento de adaptación del margen aplicado al total de recursos disponibles, ya que, por ejemplo, para un modelo FTP, el porcentaje de descarte de paquetes de datos no es un factor que represente si se están satisfaciendo o no los requisitos de QoS de los usuarios. Por lo tanto, se podrían evaluar las prestaciones de las estrategias de control de admisión considerando diferentes tipos de tráfico de forma simultánea, e incluso considerar mecanismos para priorizar ciertos tráficos sobre otros.

7.2.3 Estrategias de control de admisión para despliegues heterogéneos

Comprobados los beneficios que aportan los despliegues heterogéneos, sería de especial interés la aplicación de estrategias de control de admisión sobre este tipo de despliegues, junto con la consideración de esquemas dinámicos de reparto de recursos frecuenciales y criterios de selección de nodo que consideren la carga de tráfico de los diferentes nodos de la red para maximizar los usuarios

que pueden ser admitidos en el sistema y minimizar la probabilidad de bloqueo de conexiones. Ya se ha visto que la estimación del consumo de recursos de los usuarios admitidos y la estimación de la demanda de recursos del nuevo usuario que solicita acceso no es trivial, y para el caso de los despliegues heterogéneos, estas estimaciones se complican todavía más. El área de cobertura de los nodos de baja potencia es por norma general bastante más reducida que la de las macroceldas, y como además los nodos de baja potencia reutilizan los mismos recursos que son empleados por las macroceldas, las condiciones de interferencia pueden ser agresivas en ciertas zonas. Por lo tanto, se hace más complejo prever el consumo de recursos de los usuarios en las subtramas futuras. Adicionalmente, para los usuarios que se conectan a la red a través de los relays es necesario estimar su consumo de recursos en su enlace de acceso, pero también es necesario estimar cuál es su consumo asociado en el enlace backhaul entre el RN y la macrocelda.

Las políticas de admisión se pueden coordinar con el criterio de selección de nodo y con un esquema dinámico de reparto de recursos, con el objetivo de optimizar la distribución de usuarios y minimizar la probabilidad de bloqueo. En el caso concreto de los despliegues heterogéneos con RNs, si se aplica el algoritmo que se ha propuesto en esta tesis, se proporciona una mayor flexibilidad al mecanismo de control de admisión. Si por ejemplo un usuario trata de acceder a una macrocelda, pero se estima que no hay suficientes recursos disponibles para satisfacer su demanda en los enlaces directos, se puede tratar de ajustar de nuevo el reparto de recursos para tratar de obtener suficientes recursos en los enlaces directos. O de forma alternativa, si ese usuario también observa buenas condiciones de canal respecto a un RN, y quedan suficientes recursos disponibles tanto en el enlace de acceso como en el enlace backhaul, se puede admitir al usuario en el RN. Por lo tanto, se trata de una línea de investigación que puede ser de gran interés.

Anexo – Publicaciones y Participación en Proyectos de I+D

A.1 Listado de publicaciones

Revistas internacionales

“Resource Allocation and Interference Management Strategies for Inband Relaying in LTE-A”

M. Eguizábal, A. Hernández

Telecommunications Systems (Springer), vol. 61, issue 4, pp 839-860, 2016.

“Joint Dynamic Resource Allocation and Load Balancing-Cell Selection in LTE-A HetNet Scenarios Based on Type I Inband Relay Deployments”

M. Eguizábal, A. Hernández

Computer Networks (Elsevier), vol. 100, pp 90-109, 2016.

Congresos internacionales

“Interference Management and Cell Range Expansion Analysis for LTE Picocell Deployments”

M. Eguizábal, A. Hernández

IEEE 24th Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Londres, Sept. 2013.

“Joint Spatial Relay Distribution and Resource Allocation & ICIC Strategies for Performance Enhancement for Inband Relay LTE-A Systems”

M. Eguizábal, A. Hernández

14th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems (NEW2AN), San Petersburgo, Agosto 2014.

“Throughput Gain by Hybrid TDM/FDM & Spatial Reuse of Resources Among Nodes and Links for Inband Relaying”

M. Eguizábal, A. Hernández

The 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SOFTCOM), Split, Sept. 2014.

“SFR-based vs. FFR-based Inter-Cell Interference Coordination for Inband Relay LTE-A Networks”

M. Eguizábal, A. Hernández

6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), San Petersburgo, Oct. 2014.

“Dynamic, Fair and Coordinated Resource Allocation for Backhaul Links for Heterogeneous Load Conditions in LTE-Advanced Relay Systems”

M. Eguizábal, A. Hernández

6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), San Petersburgo, Oct. 2014.

“Joint Dynamic Resource Allocation and Load Balancing for LTE-Advanced Relay Networks in Heterogeneous Load Conditions”

M. Eguizábal, A. Hernández

The 21th European Wireless Conference (EW), Budapest, Mayo 2015.

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)

Universidad de Zaragoza. 2009 – 2011

“Sistemas Móviles Avanzados de Banda Ancha. Gestión de Recursos Radio en Redes Heterogéneas de Infraestructura Celular y Redes Mesh Distribuidas”

Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) (ref. nº TEC2011-23037)

Universidad de Zaragoza. 2012 - 2014

“Avances de Redes de COmunicaciones de 5ª Generación (ARCO5G)”

Ministerio de Economía y Competitividad (ref. nº TEC2014-56469-REDT)

Universidad de Zaragoza. 2015 - 2016

Bibliografía

- [1] S. W. Halpern, "Reuse Partitioning in Cellular Systems", *IEEE 33rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 322-327, Toronto, Canadá, 1983.
- [2] R1-050507, "Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network WG1 Meeting #41, Huawei, 2005.
- [3] R. Zhu, X. Zhang, y W. Wang, "Scheduling Based Controllable Interference Coordination in OFDMA Systems", *International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom)*, pp. 1-5, Pekín, China, 2006.
- [4] M. Qian, W. Hardjawana, Y. Li, B. Vucetic, J. Shi, y X. Yang, "Inter-cell Interference Coordination through Adaptive Soft Frequency Reuse in LTE Networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1618-1623, Shanghai, China, 2012.
- [5] R1-050738, "Interference Mitigation – Considerations and Results on Frequency Reuse", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network WG1 Meeting #42, Siemens, 2005.
- [6] M. Porjazoski y B. Popovski, "Contribution to Analysis of Intercell Interference Coordination in LTE: A Fractional Frequency Reuse Case", *Global Mobile Congress (GMC)*, pp. 1-4, Shanghai, China, 2010.
- [7] D. Bilios, C. Bouras, V. Kokkinos, A. Papazois, y G. Tseliou, "Optimization of Fractional Frequency Reuse in Long Term Evolution Networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1853-1857, Shanghai, China, 2012.
- [8] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang, y D. Yang, "A Novel Multi-Cell OFDMA System Structure using Fractional Frequency Reuse", *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-5, Atenas, Grecia, 2007.

- [9] C. S. Chiu y C. C. Huang, "Combined Partial Reuse and Soft Handover in OFDMA Downlink Transmission", *IEEE 67th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1707-1711, Marina Bay, Singapur, 2008.
- [10] A. Darwish, A. S. Ibrahim, A. H. Badawi, y H. Elgebaly, "Performance Improvement of Fractional Frequency Reuse in WiMAX Network", *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Yokohama, Japón, 2011.
- [11] I. G. Fraimis, V. D. Papoutsis, y S. A. Kotsopoulos, "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)*, pp. 1354-1359, Estambul, Turquía, 2010.
- [12] L. Chen y D. Yuan, "Generalized Frequency Reuse Schemes for OFDMA Networks: Optimization and Comparison", *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Taipéi, Taiwán, 2010.
- [13] T. Novlan, J. G. Andrews, I. Sohn, R. K. Ganti, y A. Ghosh, "Comparison of Fractional Frequency Reuse Approaches in the OFDMA Cellular Downlink", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-5, Miami, Estados Unidos, 2010.
- [14] A. Hernández, I. Guío, y A. Valdovinos, "Downlink Scheduling for Intercell Interference Fluctuation Mitigation in Partial-Loaded Broadband Cellular OFDMA Systems", *International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT)*, pp. 1-6, San Petersburgo, Rusia, 2009.
- [15] A. Hernández, I. Guío, V. Montero, y A. Valdovinos, "Impact of ICI Management Schemes on Packet Scheduling Strategies in OFDMA Systems", *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, pp. 395-400, Modena, Italia, 2010.
- [16] J. Zhang, H. Tian, P. Tian, Y. Huang, y L. Gao, "Dynamic Frequency Reservation Scheme for Interference Coordination in LTE-Advanced Heterogeneous Networks", *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Yokohama, Japón, 2012.
- [17] X. Chu, Y. Wu, L. Benmesbah, y W.-K. Ling, "Resource Allocation in Hybrid Macro/Femto Networks", *IEEE Wireless Communication and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp. 1-5, Sídney, Australia, 2010.
- [18] H. Jung y J. Lee, "Downlink Resource Management for OFDMA Femtocells Using Stochastic Subchannel Allocation", *16th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 249-254, Auckland, Nueva Zelanda, 2010.
- [19] T. Lee, J. Yoon, S. Lee, y J. Shin, "Interference Management in OFDMA

- Femtocell Systems Using Fractional Frequency Reuse", *International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, pp. 176-180, Chengdu, China, 2010.
- [20] H. C. Jang y W. Di Wend, "Interference Management Using Frequency Reuse and CoMP for LTE-Advanced Networks", *International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 740-745, Sapporo, Japón, 2015.
- [21] S. Saadat, D. Chen, y T. Jiang, "QoS Guaranteed Resource Allocation Scheme for Cognitive Femtocells in LTE Heterogeneous Networks with Universal Frequency Reuse", *Mobile Networks and Applications*, Springer, vol. 21, n.º 6, pp. 930-942, 2016.
- [22] R1-100701, "Importance of Serving Cell Selection in Heterogeneous Networks", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network WG1 Meeting #59, Qualcomm, 2010.
- [23] D. López-Pérez y X. Chu, "Inter-Cell Interference Coordination for Expanded Region Picocells in Heterogeneous Networks", *20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 1-6, Maui, EEUU, 2011.
- [24] D. López-Pérez, X. Chu, y Í. Guvenc, "On the Expanded Region of Picocells in Heterogeneous Networks", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, IEEE, vol. 6, n.º 3, pp. 281-294, 2012.
- [25] H. E. Elfadil, M. A. I. Ali, y M. Abas, "Performance Evaluation of Heterogeneous Networks Schemes in LTE Networks", *International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE)*, pp. 401-408, Jartum, Sudán, 2015.
- [26] W. C. Pao, J. W. Lin, Y. F. Chen, y C. L. Wang, "Joint ABS and User Grouping Allocation for HetNet with Picocell Deployment in Downlink", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, vol. 2017, n.º 163, pp. 1-14, 2017.
- [27] Y. C. Wang y S. T. Chen, "Adaptive Configuration of Time-Domain eICIC to Support Multimedia Communications in LTE-A Heterogeneous Networks", *18th IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1-6, Macao, China, 2017.
- [28] L. Weifeng, Y. Li, Z. Qihua, y C. Siguang, "Performance Analysis of Cell Selection Solution in Macro-Pico Heterogeneous Networks", *2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 1530-1534, Chengdu, China, 2016.
- [29] A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval, y R. Basa, "Resource Management Method in LTE Heterogeneous Networks", *14th International*

- Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, pp. 1131-1134, Slavske, Ucrania, 2018.
- [30] TR 36.839, "Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, v11.1.0, 2012.
- [31] TS 36.211, "Physical channels and modulation", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, v14.0.0, 2016.
- [32] TR 36.814, "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, v9.1.0, 2016.
- [33] TS 36.104, "Base Station (BS) radio transmission and reception", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, v14.1.0, 2016.
- [34] W. C. Jakes, "Microwave Mobile Communications", *John Wiley & Sons*, 1974.
- [35] M. Dehghani, K. Arshad, y R. MacKenzie, "LTE-Advanced Radio Access Enhancements: A Survey", *Wireless Personal Communications, Springer*, vol. 80, n.º 3, pp. 891-921, 2014.
- [36] A. B. Saleh, S. Redana, J. Hämäläinen, y B. Raaf, "On the Coverage Extension and Capacity Enhancement of Inband Relay Deployments in LTE-Advanced Networks", *Journal of Electrical and Computer Engineering, Hindawi*, vol. 2010, pp. 1-12, 2010.
- [37] C. Hoymann, W. Chen, J. Montojo, A. Golitschek, C. Koutsimanis, y X. Shen, "Relaying Operation in 3GPP LTE: Challenges and Solutions", *IEEE Communications Magazine, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, vol. 50, n.º 2, pp. 156-162, 2012.
- [38] Y. L. Lee, T. C. Chuah, J. Loo, y A. Vinel, "Recent Advances in Radio Resource Management for Heterogeneous LTE/LTE-A Networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, vol. 16, n.º 4, pp. 2142-2180, 2014.
- [39] W. Park y S. Bahk, "Resource Management Policies for Fixed Relays in Cellular Networks", *Computer Communications, Elsevier*, vol. 32, n.º 4, pp. 703-711, 2009.
- [40] L. Wang, Y. Ji, F. Liu, y J. Li, "Performance Improvement through Relay-Channel Partitioning and Reuse in OFDMA Multihop Cellular Networks", *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 177-182, La Canea, Grecia, 2008.
- [41] Y. Yu, E. Dutkiewicz, X. Huang, y M. Mueck, "Inter-Cell Interference Coordination for Type I Relay Networks in LTE Systems", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Houston, EEUU, 2011.

-
- [42] Y. Yu, E. Dutkiewicz, X. Huang, y M. Mueck, "Interference Coordination and Performance Enhancement for Shared Relay Networks in LTE-Advanced Systems", *11th International Symposium on Communications & Information Technologies (ISCIT)*, pp. 384-389, Hangzhou, China, 2011.
- [43] S. Yi y M. Lei, "Inter-Cell Interference Coordination in LTE-Advanced Inband Relaying Systems", *IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1743-1747, Londres, Inglaterra, 2013.
- [44] P. Ren, X. Li, C. Pan, X. Shen, J. Zhang, L. Sang, y D. Yang, "A Novel Inter-Cell Interference Coordination Scheme for Relay Enhanced Cellular Networks", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1-5, San Francisco, EEUU, 2011.
- [45] J. Liu, D. Wang, J. Pang, J. Wang, y G. Shen, "Inter-Cell Interference Coordination Based on Soft Frequency Reuse for Relay Enhanced Cellular Network", *21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 2304-2308, Estambul, Turquía, 2010.
- [46] A. B. Saleh, Ö. Bulakci, S. Redana, B. Raaf, y J. Hämäläinen, "Enhancing LTE-Advanced Relay Deployments via Biasing in Cell Selection and Handover Decision", *21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 2277-2281, Estambul, Turquía, 2010.
- [47] I. Guío, Á. Hernández, J. Chóliz, y A. Valdovinos, "Resource Allocation Strategies for Full Frequency Reuse in Tri-Sectorized Multi-Cell OFDMA Systems", *Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley & Sons*, vol. 14, n.º 2, pp. 297-320, 2014.
- [48] A. Pokhariyal, K. I. Pedersen, G. Monghal, I. Z. Kovacs, C. Rosa, T. E. Kolding, y P. E. Mogensen, "HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution", *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 2761-2765, Dublín, Irlanda, 2007.
- [49] L. Xiao y L. Cuthbert, "A Two-Hop Proportional Fairness Scheduling Algorithm for Relay Based OFDMA Systems", *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp. 1-4, Dalian, China, 2008.
- [50] H. Chen, M. Peng, y J. Jiang, "A Resource Configuration Scheme in OFDMA-Based Cellular Relay Networks", *1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops (ICCC)*, pp. 102-107, Pekín, China, 2012.
- [51] X. Wu, W. Zhao, y W. Wu, "Throughput and Fairness-Balanced

- Resource Allocation Algorithm in TD-LTE-Advanced Relay-Enhanced Network", *International Workshop on High Mobility Wireless Communications (HMWC)*, pp. 82-86, Shanghai, China, 2013.
- [52] X. Wu, Y. Pei, F. Labeau, y W. Zhao, "Fairness-Aware Resource Allocation in Relay-Enhanced TD-LTE-A Systems", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1-5, Montreal, Canadá, 2016.
- [53] P. Arnold, V. Rakocevic, y J. Habermann, "Hybrid Radio Resource Management with Co-Scheduling for Relay Extended OFDMA Networks", *Wireless Personal Communications, Springer*, vol. 109, pp. 1133-1160, 2019.
- [54] T. M. De Moraes, A. B. Saleh, G. Bauch, y E. Seidel, "QoS-Aware Traffic Scheduling in LTE-Advanced Relay-Enhanced Networks", *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Dresde, Alemania, 2013.
- [55] O. A. Elgendy, M. H. Ismail, y K. M. F. Elsayed, "Radio Resource Management for LTE-A Relay-Enhanced Cells with Spatial Reuse and Max-Min Fairness", *Telecommunication Systems, Springer*, vol. 68, pp. 643-655, 2018.
- [56] H. Hassan, I. Ahmed, R. Ahmad, H. Khammari, G. Bhatti, W. Ahmed, y M. M. Alam, "A Machine Learning Approach to Achieving Energy Efficiency in Relay-Assisted LTE-A Downlink System", *Sensors, MDPI AG*, vol. 19, n.º 16, pp. 1-25, 2019.
- [57] J. Wang, J. Liu, D. Wang, J. Pang, G. Shen, y J. Chen, "Load Balance Based Dynamic Inter-Cell Interference Coordination for Relay Enhanced Cellular Network", *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Yokohama, Japón, 2012.
- [58] A. S. Mohamed, M. Abd-Elnaby, y S. A. El-Dolil, "Self-Organized Dynamic FFR Resource Allocation Scheme for LTE-Advanced Relay Based Networks", *Wireless Personal Communications, Springer*, vol. 91, pp. 933-955, 2016.
- [59] L. Cao, T. Zhang, y C. Feng, "Joint Adaptive Soft Frequency Reuse and Virtual Cell Power Control in Relay Enhanced Cellular System", *International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology (CNMT)*, pp. 1-5, Wuhan, China, 2009.
- [60] Z. Ma, K. Zheng, W. Wang, y Y. Liu, "Route Selection Strategies in Cellular Networks with Two-Hop Relaying", *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp. 1-4, Pekín, China, 2009.
- [61] Q. Li, R. Q. Hu, y G. Wu, "Mobile Association for Wireless Heterogeneous Networks with Cooperative Relays: Optimal Framework and Implementation Schemes", *Telecommunication Systems, Springer*,

- vol. 60, pp. 17-27, 2015.
- [62] J. B. Tomas-Gabarron y Y. Ghamri-Doudane, "Distributed Load Balancing by Two-Hop Relaying in LTE-Advanced Networks", *11th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pp. 337-345, Singapur, Singapur, 2014.
- [63] H. Farooq, A. Imran, y M. Jaber, "AI Empowered Smart User Association in LTE Relays Hetnets", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, Shanghai, China, 2019.
- [64] R. Guérin, H. Ahmadi, y M. Naghshineh, "Equivalent Capacity and Its Application to Bandwidth Allocation in High-Speed Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, vol. 9, n.º 7, pp. 968-981, 1991.
- [65] W. Lu, M. Gu, y L. Yang, "Subcarrier Requirement Analysis for Downlink OFDMA Cellular System", *Chinese Journal of Electronics, Institution of Engineering and Technology (IET)*, vol. 26, n.º 5, pp. 1086-1091, 2017.
- [66] B. Sas, E. Bernal-Mor, K. Spaey, V. Pla, C. Blondia, y J. Martinez-Bauset, "Modelling the Time-Varying Cell Capacity in LTE Networks", *Telecommunication Systems, Springer*, vol. 55, n.º 2, pp. 299-313, 2014.
- [67] M. K. Luka, A. A. Atayero, y O. I. Oshin, "Call Admission Control Techniques for 3GPP LTE: A Survey", *SAI Computing Conference (SAI)*, pp. 691-700, Londres, Inglaterra, 2016.
- [68] S. A. Alqahtani y A. S. Mahmoud, "Uplink Call Admission Schemes for 3G and Beyond Mobiles Wireless Networks Supporting Heterogeneous Traffic", *International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications (ICTTA)*, pp. 2657-2662, Damasco, Siria, 2006.
- [69] M. Qian, Y. Huang, J. Shi, Y. Yuan, L. Tian, y E. Dutkiewicz, "A Novel Radio Admission Control Scheme for Multiclass Services in LTE Systems", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Honolulu, Estados Unidos, 2009.
- [70] A. El Bouchti, A. Haqiq, y A. Benjelloun, "Performance Analysis of Admission Control and Degradation Service Mechanism for Multiclass Services in LTE System", *4th International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*, pp. 231-236, Luton, Inglaterra, 2014.
- [71] L. Sivridis y J. He, "A Cost Based Complete Partitioning Congestion Control Strategy for Multiservice OFDMA Networks", *Wireless Personal Communications, Springer*, vol. 71, pp. 2965-2979, 2013.
- [72] A. Belghith, M. B. Mohamed, y M. S. Obaidat, "Efficient Bandwidth Call Admission Control in 3GPP LTE Networks", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Washington D.C.,

- Estados Unidos, 2016.
- [73] J. Sun, L. Feng, P. Yu, W. Li, X. Qiu, y L. Meng, "Preventing Congestion by Selective Admission Control in LTE-Based Public Safety Network", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Sídney, Australia, 2017.
- [74] M. A. Safwat, H. M. El-Badawy, y A. Yehya, "Performance Analysis for New Call Bounding Scheme with SFR in LTE-Advanced Networks", *IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)*, pp. 442-451, París, Francia, 2014.
- [75] S. P. Chung y Y. W. Chen, "Performance Analysis of Call Admission Control in SFR-Based LTE Systems", *IEEE Communications Letters, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, vol. 16, n.º 7, pp. 1014-1017, 2012.
- [76] TR 25.892, "Feasibility Study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, v6.0.0, 2004.