

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

---

**Planificación automática de  
parámetros en redes LTE  
mediante teoría de grafos**

---

*Autora:*

ROCÍO ACEDO HERNÁNDEZ

*Director:*

DR. MATÍAS TORIL GENOVÉS

28 de julio de 2017





Por la presente, **Dr. D. Matías Toril Genovés**, profesor doctor del *Departamento de Ingeniería de Comunicaciones* de la Universidad de Málaga,

**CERTIFICA:**

Que **D<sup>a</sup>. Rocío Acedo Hernández**, Ingeniera de Telecomunicación, ha realizado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga bajo su dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su TESIS DOCTORAL titulada:

**“Planificación automática de parámetros en redes LTE mediante teoría de grafos”**

En dicho trabajo se han propuesto aportaciones originales para la planificación automática de redes de acceso radio LTE. En particular, se han propuesto dos métodos de planificación de parámetros que resuelven problemas formulados mediante teoría de grafos. En primer lugar, se ha propuesto un método para la asignación de identificadores físicos de celda, que considera tanto el rendimiento en el enlace ascendente como en el descendente de LTE. En segundo lugar, se ha propuesto un método de asignación de celdas pequeñas a emplazamientos en redes celulares heterogéneas que reduce los costes de despliegue. Los resultados expuestos han dado lugar a publicaciones en revista y congresos.

Por todo ello, considera que esta Tesis es apta para su presentación al Tribunal que ha de juzgarla. Y para que conste a efectos de lo establecido en el Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de Doctorado, AUTORIZA la presentación de esta Tesis en la Universidad de Málaga.

En Málaga, a 17 de abril de 2017

Director y tutor de Tesis

Fdo: Matías Toril Genovés



**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE**  
**TELECOMUNICACIÓN**

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por:

Presidente: Dr. D. \_\_\_\_\_

Secretario: Dr. D. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. D. \_\_\_\_\_

para juzgar la Tesis Doctoral titulada “*Planificación automática de parámetros en redes LTE mediante teoría de grafos*”, realizada por D<sup>a</sup>. Rocío Acedo Hernández y dirigida por el Dr. D. Matías Toril Genovés, acordó por

\_\_\_\_\_ otorgar la calificación de  
\_\_\_\_\_ y para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal la presente diligencia.

Málaga, a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

El Presidente:

El Secretario:

Fdo.: \_\_\_\_\_

Fdo.: \_\_\_\_\_

El Vocal:

Fdo.: \_\_\_\_\_



*A Manuel.*



# *Agradecimientos*

Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas, que de una u otra manera, colaboraron para que el presente trabajo de investigación pudiera llevarse a cabo.

A mi tutor, Matías Toril, por su esfuerzo, dedicación durante todos estos años, por su transmisión de conocimientos y orientación. A Salvador Luna, de igual forma maestro en todo este proceso.

A todos y cada uno de los compañeros que han pasado por mi vida a lo largo de estos años. A mis compañeros de la universidad: Jose Ángel, Víctor, Pablo, Antonio, Ana Belén, Jose María, Isa, Pablo, Ana, Alex, Sergio, Inma, Almudena, ... y a mis compañeros de trabajo en Ericsson, a todo el equipo de ECO, por recibirme con los brazos abiertos. Y en especial a Pepe, María José, Carlos y Juan, muy involucrados en todo lo aquí presentado.

También quiero agradecer este trabajo a mi familia, a mis padres, mi hermana, familia Gómez y a mis amigos, tan presentes siempre que hacen falta. En especial, quiero agradecer a mi padre, quien me ha enseñado que rendirse no es nunca una opción y del que sus ganas de aprender y mejorar siempre son para mí la mejor inspiración.

Por último, a Álex, mi mejor compañero y mi apoyo siempre, y a mi niño, que sin saberlo me ha dado el último empujón para terminar todo este proceso.



# Índice general

Agradecimientos	ix
Índice	x
Resumen	xv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tablas	xix
Acrónimos	xxi
Símbolos	xxvii
Introducción	1
<b>1. Planificación automática de parámetros en redes LTE</b>	<b>9</b>
1.1. Estándar LTE . . . . .	9
1.1.1. Arquitectura de red . . . . .	9
1.1.2. Nivel físico . . . . .	12
1.1.3. Nivel de enlace . . . . .	14
1.1.4. Capa de red . . . . .	15
1.2. Planificación automática de redes móviles . . . . .	16
<b>2. Planificación automática de identificadores de celda en LTE</b>	<b>21</b>
2.1. Introducción . . . . .	22
2.1.1. Trabajo relacionado y contribución . . . . .	23
2.2. Formulación del problema . . . . .	25
2.2.1. Señales de sincronización . . . . .	26
2.2.2. Problemas de colisión y confusión de PCI . . . . .	28
2.2.3. Influencia del PCI en las señales de referencia del enlace descendente . . . . .	29
2.2.4. Influencia del PCI en las señales de referencia en el enlace ascendente . . . . .	33

2.3.	Modelo de sistema del enlace descendente . . . . .	36
2.3.1.	Esquemas de planificación de PSS . . . . .	36
2.3.2.	Modelo de rendimiento del PDSCH . . . . .	37
2.3.2.1.	Modelo de interferencia . . . . .	38
2.3.2.2.	Análisis teórico preliminar . . . . .	42
2.3.2.3.	Modelo de adaptación del enlace en el PDSCH . . . . .	43
2.3.3.	Análisis de rendimiento . . . . .	45
2.3.3.1.	Metodología experimental . . . . .	45
2.3.3.2.	Análisis de resultados . . . . .	52
2.3.4.	Conclusiones . . . . .	64
2.4.	Modelo de sistema del enlace ascendente . . . . .	68
2.4.1.	Técnicas de protección del PUCCH . . . . .	68
2.4.1.1.	Formatos de trama en el PUCCH . . . . .	68
2.4.1.2.	Transmisiones simultáneas en el PUCCH . . . . .	69
2.4.2.	Modelo de rendimiento del PUCCH . . . . .	75
2.4.2.1.	Cálculos de los niveles de interferencia en el PUCCH . . . . .	75
2.4.2.2.	Probabilidad de fallo en el canal PUCCH . . . . .	80
2.4.3.	Análisis de rendimiento . . . . .	82
2.4.3.1.	Metodología experimental . . . . .	82
2.4.3.2.	Análisis de resultados . . . . .	87
2.4.4.	Conclusiones . . . . .	91
2.5.	Algoritmos de planificación de PCI basados en teoría de grafos . . . . .	93
2.5.1.	Reformulación de la asignación de PCIs como problema de partición de grafos . . . . .	93
2.5.2.	Algoritmos de partición de grafos . . . . .	99
2.6.	Análisis de rendimiento . . . . .	105
2.6.1.	Metodología experimental . . . . .	105
2.6.2.	Análisis de resultados . . . . .	108
2.7.	Conclusiones . . . . .	111
<b>3.</b>	<b>Agrupación automática de emplazamientos en redes LTE hetero- géneas</b> . . . . .	<b>113</b>
3.1.	Introducción . . . . .	114
3.1.1.	Trabajo relacionado y contribución . . . . .	117
3.2.	Formulación del problema . . . . .	118
3.2.1.	Problema de selección de nuevos emplazamientos . . . . .	118
3.2.2.	Problema de agrupamiento de celdas pequeñas por empla- zamientos . . . . .	120
3.3.	Algoritmo de agrupamiento . . . . .	124
3.3.1.	Dimensionado . . . . .	125
3.3.2.	Agrupamiento . . . . .	127
3.3.3.	Ordenación de emplazamientos candidatos interior . . . . .	131
3.3.4.	Reagrupamiento . . . . .	131
3.4.	Análisis de rendimiento . . . . .	133

3.4.1.	Metodología experimental . . . . .	133
3.4.2.	Análisis de resultados . . . . .	137
3.5.	Conclusiones . . . . .	142
<b>4.</b>	<b>Conclusiones Finales</b>	<b>145</b>
4.1.	Principales contribuciones . . . . .	145
4.1.1.	Planificación de identificadores de celda en LTE . . . . .	146
4.1.2.	Selección de emplazamientos de interior . . . . .	148
4.2.	Líneas Futuras . . . . .	149
4.2.1.	Planificación de identificadores físicos de celda en LTE . . . . .	149
4.2.2.	Selección de emplazamientos de interior en redes LTE heterogéneas . . . . .	151
4.3.	Lista de Publicaciones . . . . .	152
<b>A.</b>	<b>Simulador dinámico de nivel de sistema para LTE</b>	<b>155</b>
A.1.	Estructura básica . . . . .	155
A.1.1.	Escenario de simulación . . . . .	155
A.1.2.	Diagrama de flujo del simulador . . . . .	156
A.2.	Nivel físico . . . . .	159
A.2.1.	Pérdidas de trayecto y desvanecimiento lento . . . . .	159
A.2.2.	Desvanecimiento rápido . . . . .	160
A.3.	Nivel de enlace . . . . .	161
A.3.1.	Cálculo de SIR . . . . .	161
A.3.2.	Esquema de retransmisión . . . . .	163
A.3.3.	Adaptación del enlace . . . . .	164
A.3.4.	Asignación dinámica de recursos . . . . .	164
A.4.	Nivel de red . . . . .	165
A.4.1.	Control de admisión . . . . .	165
A.4.2.	Detección automática de vecinas . . . . .	166
A.4.3.	Traspaso . . . . .	166
<b>B.</b>	<b>Simulador estático de nivel de sistema para LTE</b>	<b>169</b>
B.1.	Estructura básica . . . . .	169
B.1.1.	Escenario de simulación . . . . .	169
B.1.2.	Diagrama de flujo del simulador . . . . .	171
B.2.	Nivel físico . . . . .	172
B.3.	Nivel de enlace . . . . .	175
B.3.1.	Algoritmo de control de potencia en el enlace ascendente . . . . .	175
B.3.2.	Esquema de asignación de PRB en el enlace ascendente . . . . .	176
B.3.3.	Esquema de modulación y codificación adaptativa . . . . .	177
B.4.	Nivel de red . . . . .	177
B.4.1.	Control de admisión . . . . .	178
B.4.2.	Detección automática de vecinas . . . . .	178



# Resumen

En las redes de comunicaciones móviles, las tareas de planificación son de vital importancia, ya que permiten aprovechar al máximo la capacidad de los equipos de los que se dispone mediante una configuración inicial óptima de sus parámetros. Lamentablemente, el aumento de la complejidad de las redes móviles en los últimos años dificulta enormemente estas tareas de planificación. Por ello, operadores y fabricantes vienen buscando la forma de automatizar los procesos de planificación, empleando técnicas de redes autoorganizadas (*Self-Organizing Networks*, SON).

En esta tesis, se proponen dos métodos de planificación automática de parámetros para la red de acceso radio del sistema *Long Term Evolution* (LTE). Como nexo de unión, ambos métodos formulan y resuelven el problema mediante teoría de grafos.

Por un lado, se propone un método de planificación de identificadores físicos de celda (*Physical Cell Identifier*, PCI). A diferencia de trabajos anteriores, el método propuesto optimiza el rendimiento tanto del enlace ascendente como descendente de LTE, además de resolver los problemas clásicos de colisión y confusión de identificadores. Como punto de partida, se realiza un estudio preliminar para cuantificar el impacto de la planificación de PCIs en ambos enlaces, mediante sendos modelos analíticos de rendimiento del canal de acceso compartido del enlace descendente (*Physical Downlink Shared CHannel*, PDSCH) y del canal de control del enlace ascendente (*Physical Uplink Control CHannel*, PUCCH). De los resultados obtenidos al integrar estos modelos en herramientas de simulación, se extraen los requisitos que debe cumplir un buen plan de PCI.

Tras formular el problema, se propone un nuevo método de resolución heurístico basado en técnicas de partición de grafos, que tiene en cuenta tanto los problemas de colisión-confusión de identificadores de celda, como las colisiones de señales de referencia del enlace descendente y ascendente. El método se prueba con una

instancia del problema construida a partir de datos de la red real. Los resultados muestran que el método es capaz de eliminar completamente los problemas de colisión y confusión, a la vez que reduce las colisiones de señales de referencia del enlace ascendente y descendente, respecto a la solución actualmente implementada en la red.

Por otra parte, se propone un método de asignación de celdas pequeñas (*small cells*) a emplazamientos para reducir los costes de despliegue en redes celulares heterogéneas. Para ello, se desarrolla un modelo analítico del problema, basado en programación lineal entera, que establece los costes de implementación tras el agrupamiento de equipos en función de la distancia entre celdas. Con este modelo, se resuelve el problema de asignación de emplazamiento con un método exacto mediante una herramienta de optimización entera. Como alternativa, se propone un método heurístico de agrupamiento de celdas pequeñas, que, por su simplicidad, puede integrarse en algoritmos de selección de emplazamientos de interior. Los métodos propuestos se evalúan con simulaciones realizadas sobre instancias del problema construidas con datos de una red real. Los resultados muestran que, cuando se consideran criterios de cobertura, capacidad y coste monetario al seleccionar los nuevos emplazamientos de interior, la inclusión del método propuesto reduce enormemente el coste total de la red.

Los métodos desarrollados en esta tesis han sido concebidos para su integración en una herramienta de planificación comercial. Por ello, en su desarrollo, se presta especial atención a los requisitos de los operadores y a la eficiencia computacional de los algoritmos de resolución.

# Índice de figuras

1.1. Arquitectura básica de red LTE. . . . .	10
1.2. Estructura de recursos en LTE (caso de prefijo cíclico normal). . . . .	13
1.3. Arquitectura de sistema SON. . . . .	20
2.1. Estructura de señales de sincronización. . . . .	27
2.2. Problemas de colisión y confusión en la planificación de PCI. . . . .	29
2.3. Patrón de señales de referencia en el enlace descendente. . . . .	31
2.4. Estructura de recursos radio del enlace ascendente. . . . .	33
2.5. Estructura del canal PUCCH. . . . .	35
2.6. Patrón de CRS en celdas vecinas con distintos planes de PSS. . . . .	37
2.7. Estructura de variables utilizadas en el modelo de interferencia (caso $M$ usuarios, $N$ celdas, 25 PRBs). . . . .	39
2.8. Posibles desplazamientos temporales y su probabilidad de colisión. . . . .	42
2.9. BLER según SINR para los diferentes esquemas de modulación y codificación. . . . .	44
2.10. Eficiencia espectral según SINR [1]. . . . .	45
2.11. Escenario de simulación. . . . .	46
2.12. Plan de PSS representado en el escenario. . . . .	49
2.13. Distribución de carga no uniforme. . . . .	51
2.14. Distribución de SINR de CRS para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB). . . . .	54
2.15. Distribución de CQI para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB). . . . .	55
2.16. Distribución de <i>Throughput</i> de usuario en el enlace descendente para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB). . . . .	57
2.17. Distribución de <i>Throughput</i> de celda en el enlace descendente para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB). . . . .	59
2.18. Distribución de SINR y CQI con carga uniforme y no uniforme (servicio FB). . . . .	62
2.19. Distribución de <i>throughput</i> de usuario y celda con distribución de carga uniforme y no uniforme (servicio FB). . . . .	63
2.20. Tasas de bloqueo y caída de llamadas para distintas cargas de red (servicio VoIP, carga uniforme). . . . .	65
2.21. Recursos en tiempo y frecuencia para distintos formatos del PUCCH. . . . .	70
2.22. Estructura temporal de los diferentes formatos del PUCCH (con prefijo cíclico normal). . . . .	70

2.23. Valores de $\varphi(n)$ para la generación de las secuencias base [2]. . . . .	72
2.24. Escenario de simulación. . . . .	82
2.25. Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b en el caso ideal. . . . .	88
2.26. Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con control de potencia en lazo abierto. . . . .	89
2.27. Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con ortogonalidad parcial. . . . .	90
2.28. Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con distribución de tráfico no uniforme. . . . .	91
2.29. Rendimiento del PUCCH con distribución de tráfico no uniforme para formato de trama 2/2a/2b. . . . .	91
2.30. Estructura del grafo de red. . . . .	94
2.31. Separación en un único grafo por problema. . . . .	96
2.32. Algoritmo de refinamiento multinivel clásico. . . . .	100
2.33. Pseudocódigo del algoritmo de planificación de PCI propuesto. . . . .	101
2.34. Pseudocódigo del algoritmo de Fiduccia-Mattheyses propuesto. . . . .	103
2.35. Grafo de red. . . . .	106
2.36. Mapa del plan considerando todas las restricciones (ColConfDLUL). . . . .	110
2.37. Compromiso entre colisiones del enlace descendente y ascendente en el método propuesto. . . . .	111
3.1. Arquitectura de un sistema genérico escalable de celdas pequeñas. . . . .	116
3.2. Estructura del sistema de celdas pequeñas <i>Radio Dots</i> . . . . .	121
3.3. Arquitectura del sistema celdas pequeñas <i>Radio Dots</i> . . . . .	122
3.4. Ejemplos de estructura de red para interiores (IBS). . . . .	123
3.5. Diagrama de flujo del algoritmo de selección de emplazamiento. . . . .	124
3.6. Ejemplo real de geometría de un edificio. . . . .	127
3.7. Diagrama de flujo del algoritmo de agrupamiento. . . . .	129
3.8. Casos de reagrupamiento. . . . .	132
3.9. Escenario urbano. . . . .	135
3.10. Comparativa de métodos (solo criterio monetario). . . . .	138
3.11. Sensibilidad del coste al orden de selección de emplazamientos en distintos métodos. . . . .	139
3.12. Comparativa de métodos (con todos los criterios). . . . .	141
3.13. Impacto del agrupamiento en la ganancia de cobertura y capacidad. . . . .	142
A.1. Escenario de simulación. . . . .	156
A.2. Diagrama de flujo del simulador dinámico LTE. . . . .	157
A.3. Esquemas de modulación y codificación según SINR. . . . .	163
B.1. Escenario real con límites costeros. . . . .	170
B.2. Escenario real con edificios. . . . .	170
B.3. Diagrama de flujo del simulador estático. . . . .	171

# Índice de tablas

1.1. Canalización en el sistema LTE. . . . .	12
1.2. Capacidad de un sistema LTE. . . . .	14
2.1. Parámetros de simulación. . . . .	46
2.2. Casos de uso simulados. . . . .	50
2.3. SINR de CRSs en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ). . . . .	53
2.4. SINR de CRSs en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ). . . . .	54
2.5. Distribución de <i>Throughput</i> de usuario en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ). . . . .	58
2.6. Distribución de <i>Throughput</i> de usuario en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ). . . . .	58
2.7. <i>Throughput</i> de celda en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ). . . . .	58
2.8. <i>Throughput</i> de celda en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ). . . . .	58
2.9. Formato de trama del PUCCH [3]. . . . .	69
2.10. Parámetros de simulación. . . . .	83
2.11. Comparación del rendimiento de diferentes planes de PCI. . . . .	108
2.12. Tiempos de ejecución en los distintos planes de PCI. . . . .	111
3.1. Parámetros de simulación. . . . .	136
A.1. Parámetros de simulación. . . . .	157
B.1. Parámetros de simulación. . . . .	172



# Acrónimos

<b>3GPP</b>	<b>3rd Generation Partnership Project</b>
<b>AC</b>	<b>Admission Control</b>
<b>ACK</b>	<b>ACKnowledgement</b>
<b>AMC</b>	<b>Adaptive Modulation and Coding</b>
<b>ANR</b>	<b>Automatic Neighbor Relation</b>
<b>AWGN</b>	<b>Additive White Gaussian Noise</b>
<b>BE</b>	<b>Best Effort</b>
<b>BER</b>	<b>Bit Error Rate</b>
<b>BLER</b>	<b>Block Error Rate</b>
<b>BW</b>	<b>BandWidth</b>
<b>CAPEX</b>	<b>CApital EXpenditures</b>
<b>CBR</b>	<b>Call Blocking Rate</b>
<b>CDM</b>	<b>Code Division Multiplexing</b>
<b>CDR</b>	<b>Call Dropping Rate</b>
<b>CCO</b>	<b>Coverage and Capacity Optimization</b>
<b>CDF</b>	<b>Cumulative Distribution Function</b>
<b>CFLP</b>	<b>Capacitated Facility Location Problem</b>
<b>CLPC</b>	<b>Closed-Loop Power Control</b>
<b>CM</b>	<b>Configuration Management settings</b>
<b>CP</b>	<b>Code Prefix</b>
<b>CPRI</b>	<b>Common Public Radio Interface</b>
<b>CQI</b>	<b>Channel Quality Indicator</b>
<b>CR</b>	<b>Cell Reselection</b>
<b>CRS</b>	<b>Cell Reference Signal</b>

---

<b>DAS</b>	<b>D</b> istributed <b>A</b> ntenna <b>S</b> ystem
<b>DM RS</b>	<b>D</b> e <b>M</b> odulation <b>R</b> eference <b>S</b> ignal
<b>DSP</b>	<b>D</b> igital <b>S</b> ignal <b>P</b> rocessing
<b>DU</b>	<b>D</b> igital <b>U</b> nit
<b>DL</b>	<b>D</b> own <b>L</b> ink
<b>ECGI</b>	<b>E</b> xtended <b>C</b> ell <b>G</b> lobal <b>I</b> dentifier
<b>ECO</b>	<b>E</b> ricsson <b>C</b> ell <b>O</b> ptimizer
<b>eNB</b>	evolved <b>N</b> ode- <b>B</b>
<b>EPC</b>	<b>E</b> volved <b>P</b> acket <b>C</b> ore
<b>ETU</b>	<b>E</b> xtended <b>T</b> ypical <b>U</b> rban
<b>E-UTRAN</b>	<b>E</b> volved <b>U</b> MTS <b>R</b> adio <b>A</b> ccess <b>N</b> etwork
<b>FB</b>	<b>F</b> ull <b>B</b> uffer
<b>FDD</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>D</b> uplex
<b>FDM</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>GSM</b>	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile communications
<b>HARQ</b>	<b>H</b> ybrid <b>A</b> utomatic <b>R</b> epeat <b>R</b> e <b>Q</b> uest
<b>HO</b>	<b>H</b> and <b>O</b> vers
<b>HSDPA</b>	<b>H</b> igh- <b>S</b> peed <b>D</b> ownlink <b>P</b> acket <b>A</b> ccess
<b>HSPA</b>	<b>H</b> igh- <b>S</b> peed <b>P</b> acket <b>A</b> ccess
<b>HSS</b>	<b>H</b> ome <b>S</b> ubscriber <b>S</b> erver
<b>IBS</b>	<b>I</b> n- <b>B</b> uilding <b>S</b> olution
<b>IMS</b>	<b>I</b> P <b>M</b> ultimedia <b>S</b> ubsystem
<b>IoT</b>	<b>I</b> nternet <b>O</b> f <b>T</b> hings
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
<b>IRU</b>	<b>I</b> ndoor <b>R</b> adio <b>U</b> nit
<b>ITU</b>	<b>I</b> nternational <b>T</b> elecommunication <b>U</b> nion
<b>iRAT</b>	<b>i</b> nter- <b>R</b> adio <b>A</b> ccess <b>T</b> echnology
<b>KPI</b>	<b>K</b> ey <b>P</b> erformance <b>I</b> ndicator
<b>LA</b>	<b>L</b> ink <b>A</b> dapation
<b>LB</b>	<b>L</b> ong <b>B</b> lock
<b>LOS</b>	<b>L</b> ine- <b>O</b> f- <b>S</b> ight

---

<b>LTE</b>	<b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution
<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>MCS</b>	<b>M</b> odulation and <b>C</b> oding <b>S</b> cheme
<b>MIMO</b>	<b>M</b> ultiple <b>I</b> nput <b>M</b> ultiple <b>O</b> utput
<b>MISO</b>	<b>M</b> ultiple <b>I</b> nput <b>S</b> ingle <b>O</b> utput
<b>MME</b>	<b>M</b> obility <b>M</b> anagement <b>E</b> ntity
<b>NACK</b>	<b>N</b> egative <b>A</b> CKnowledgement
<b>NMS</b>	<b>N</b> etwork <b>M</b> anagement <b>S</b> ystem
<b>OFDM</b>	<b>O</b> rthogonal <b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>OFDMA</b>	<b>O</b> FDMA <b>A</b> ccess
<b>OLPC</b>	<b>O</b> pen- <b>L</b> oop <b>P</b> ower <b>C</b> ontrol
<b>OPEX</b>	<b>O</b> Perational <b>E</b> Xpenditure
<b>OSS</b>	<b>O</b> perations <b>S</b> upport <b>S</b> ystems
<b>PAPR</b>	<b>P</b> eak-to- <b>A</b> verage <b>P</b> ower <b>R</b> atio
<b>PBCH</b>	<b>P</b> hysical <b>B</b> roadcast <b>C</b> Hannel
<b>PCI</b>	<b>P</b> hysical <b>C</b> ell <b>I</b> dentify
<b>PCRF</b>	<b>P</b> olicy and <b>C</b> harging <b>R</b> ules <b>F</b> unction
<b>PDCCH</b>	<b>P</b> hysical <b>D</b> ownlink <b>C</b> ontrol <b>C</b> Hannel
<b>PDSCH</b>	<b>P</b> hysical <b>D</b> ownlink <b>S</b> hared <b>C</b> Hannel
<b>P-GW</b>	<b>P</b> acket <b>D</b> ata <b>N</b> etwork <b>G</b> ate <b>W</b> ay
<b>PIRE</b>	<b>P</b> otencia <b>I</b> sotrópica <b>R</b> adiada <b>E</b> quivalente
<b>PL</b>	<b>P</b> ropagation <b>L</b> osses
<b>PM</b>	<b>P</b> erformance <b>M</b> easurements
<b>PMCH</b>	<b>P</b> hysical <b>M</b> ulticast <b>C</b> Hannel
<b>PRACH</b>	<b>P</b> hysical <b>R</b> andom <b>A</b> ccess <b>C</b> hannel
<b>PRB</b>	<b>P</b> hysical <b>R</b> esource <b>B</b> lock
<b>PSS</b>	<b>P</b> rimary <b>S</b> ynchronization <b>S</b> ignal
<b>PUCCH</b>	<b>P</b> hysical <b>U</b> plink <b>C</b> ontrol <b>C</b> Hannel
<b>PUSCH</b>	<b>P</b> hysical <b>U</b> plink <b>S</b> hared <b>C</b> Hannel
<b>QAM</b>	<b>Q</b> uadrature <b>A</b> mplitude <b>M</b> odulation
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality of <b>S</b> ervice

---

<b>QPSK</b>	<b>Q</b> uadrature <b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>RACH</b>	<b>R</b> andom <b>A</b> ccess <b>C</b> Hannel
<b>RAM</b>	<b>R</b> andom <b>A</b> ccess <b>M</b> emory
<b>RDS</b>	<b>R</b> adio <b>D</b> ot <b>S</b>
<b>RE</b>	<b>R</b> esource <b>E</b> lement
<b>RLC</b>	<b>R</b> adio <b>L</b> ink <b>C</b> ontrol
<b>RNC</b>	<b>R</b> adio <b>N</b> etwork <b>C</b> ontroller
<b>RRM</b>	<b>R</b> adio <b>R</b> esource <b>M</b> anagement
<b>RSRP</b>	<b>R</b> eference <b>S</b> ignal <b>R</b> eceived <b>P</b> ower
<b>RSRQ</b>	<b>R</b> eference <b>S</b> ignal <b>R</b> eceived <b>Q</b> uality
<b>SA</b>	<b>S</b> imulated <b>A</b> nnealing
<b>SCH</b>	<b>S</b> ynchronization <b>C</b> Hannel
<b>SC-OFDMA</b>	<b>S</b> ingle <b>C</b> arrier - <b>O</b> FDMA
<b>SF</b>	<b>S</b> low <b>F</b> ading
<b>S-GW</b>	<b>S</b> erving <b>G</b> ate <b>W</b> ay
<b>SINR</b>	<b>S</b> ignal-to- <b>I</b> nterference-plus- <b>N</b> oise <b>R</b> atio
<b>SIMO</b>	<b>S</b> ingle- <b>I</b> nterfered <b>M</b> ultiple- <b>O</b> utput
<b>SISO</b>	<b>S</b> ingle- <b>I</b> nterfered <b>S</b> ingle- <b>O</b> utput
<b>SON</b>	<b>S</b> elf- <b>O</b> rganizing <b>N</b> etworks
<b>SSS</b>	<b>S</b> econdary <b>S</b> ynchronization <b>S</b> ignal
<b>SR</b>	<b>S</b> cheduling <b>R</b> equest
<b>TA</b>	<b>T</b> iming <b>A</b> dvance
<b>TCP</b>	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol
<b>TDD</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>D</b> uplex
<b>TM</b>	<b>T</b> ransmission <b>M</b> ode
<b>TPC</b>	<b>T</b> ransmit <b>P</b> ower <b>C</b> ontrol
<b>TTI</b>	<b>T</b> ransmission <b>T</b> ime <b>I</b> nterval
<b>UHF</b>	<b>U</b> ltra <b>H</b> igh <b>F</b> requency
<b>UL</b>	<b>U</b> p <b>L</b> ink
<b>ULPC</b>	<b>U</b> p <b>L</b> ink <b>P</b> ower <b>C</b> ontrol
<b>UE</b>	<b>U</b> ser <b>E</b> quipment

<b>UMTS</b>	<b>U</b> niversal <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications <b>S</b> ystem
<b>VoIP</b>	<b>V</b> oice <b>o</b> ver <b>I</b> P
<b>VoLTE</b>	<b>V</b> oice <b>o</b> ver <b>L</b> TE
<b>WCDMA</b>	<b>W</b> ideband <b>C</b> ode <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>ZC</b>	<b>Z</b> adoff- <b>C</b> hu



# Símbolos

$N_{ID}^{(1)}$	Identificador de grupo de capa física	-
$N_{ID}^{(2)}$	Identificador de capa física	-
$I_{DL}$	Interferencia en el enlace descendente	dBm
$CP_{pilotos}$	Ratio de RE dedicados a CRS	%
$CP_{datos}$	Ratio de RE dedicados a datos	%
$P_{alineado\ crs}$	Probabilidad de que las CRS estén alineadas en el tiempo	%
$L(j, k)$	Carga media del PRB $k$ en la celda interferente $j$	%
$N_{datos\ re}$	REs utilizados por PRB y slot temporal para datos	-
$N_{crs\ re}$	REs utilizados por PRB y slot temporal para CRS	-
$BS_{serv}(i)$	Celda servidora del usuario $i$	-
$\sigma$	Desviación típica del desvanecimiento lento log-normal	dB
$N_{bloqueadas}$	Número de llamadas bloqueadas	-
$N_{ofrecidas}$	Número total de llamadas intentadas	-
$N_{cursadas}$	Número total de llamadas exitosas	-
$N_{caidas}$	Número total de llamadas caídas	-
$N_m$	Longitud de secuencia	símbolos
$M_{sc}^{RS}$	Número de subportadoras asignadas	-
$N_{RB}^{UL}$	Ancho de banda total del enlace ascendente	RBs
$\alpha$	Desplazamiento cíclico en secuencia base	-
$\Delta_{shift}$	Distancia circular	-
$f_{gh}$	Patrón de salto de grupo de secuencia	-
$f_{ss}$	Desplazamiento de grupo de secuencia	-
$c$	Índice del salto de los grupos de secuencia	-
$PCI(c)$	PCI de la celda $c$	-

$\Delta_{ss}$	Factor de desacoplamiento	-
$u$	Índice de grupo de secuencia base	-
$I_{intra}(c)$	Interferencia media intracelda $c$	dBm
$I_{inter}(c, c')$	Interferencia media intercelda entre $c$ y $c'$	dBm
$N_{us_{intra}}(c)$	Número de usuarios interferentes de la celda $c$	-
$N_{us_{inter}}(c')$	Número de usuarios interferentes de las celdas colindantes $c'$	-
$\overline{P_{rx}}(c, c)$	Nivel medio de señal recibido de usuarios de la misma celda	dBm
$\overline{P_{rx}}(c, c')$	Nivel medio de señal recibido de usuarios de otras celdas	dBm
$X_{intra}$	Factor de protección contra la interferencia intracelda	-
$X_{inter}(c, c')$	Factor de protección contra la interferencia intercelda	-
$n_{us}(c)$	Número de usuarios en la celda $c$	-
$N_{us_{max}}$	Número máximo de usuarios en la celda	-
$\lambda(c)$	Ratio de llegada de peticiones	%
$\overline{n}_r$	Número medio de peticiones PUCCH por subtrama/region	-
$L_D$	Carga del canal PUCCH	%
$P_{tx}(u)$	Potencia transmitida del usuario $u$ en la celda $c'$	dBm
$L(c, u)$	Pérdidas del usuario $u$ a la celda $c$	dB
$S(u)$	Celda servidora del usuario $u$	-
$\alpha_{cs-cdm_{intra}}$	Factor de ortogonalidad entre secuencias base alineadas	-
$\alpha_{bs}$	Factor de ortogonalidad entre diferentes secuencias base	-
$\alpha_{cs-cdm_{inter}}$	Factor de ortogonalidad secuencias diferente codificación	-
$P_{0PUCCH}$	Parámetro de potencia nominal recibida en PUCCH	dBm
$\delta_{mcs}$	Offset dependiente del MCS	-
$f(\Delta_i)$	Factor de corrección de bucle cerrado	-
$SINR_{th}$	Valor umbral de SINR	dB
$P_{falloPUCCH}$	Probabilidad media de fallo en el PUCCH	%
$\gamma_{ijCC}$	Peso para los problemas de colisión y confusión	-
$\gamma_{ijDLRS}$	Peso para las colisiones de DL RS	-
$\gamma_{ijULRS}$	Peso para las colisiones de UL RS	-
$ColW$	Factor de prioridad del problema de colisión	-
$ConfW$	Factor de prioridad del problema de confusión	-

$DLRSW$	Factor de prioridad de las colisiones de DL CRS	-
$ULRSW$	Factor de prioridad de las colisiones de UL DMRS	-
$HO_{ij}$	Número de traspasos entre las celdas $i$ y $j$	-
$LDL_i$	Ratio de utilización del enlace descendente de la celda $i$	%
$LUL_i$	Ratio de utilización del enlace ascendente de la celda $i$	%
$\Pi_{CC}$	Partición del grafo CC	-
$\Pi_{DLRS}$	Partición del grafo DLRS	-
$\Pi_{ULRS}$	Partición del grafo ULRS	-
$\delta(\Pi_{CC})$	Corte de aristas en el grafo CC con la partición $\Pi_{CC}$	-
$\delta(\Pi_{DLRS})$	Corte de aristas en el grafo DLRS con la partición $\Pi_{DLRS}$	-
$\delta(\Pi_{ULRS})$	Corte de aristas en el grafo DLRS con la partición $\Pi_{ULRS}$	-
$g(i, p')$	Ganancia de la reasignación de $i$ a $p'$	-
$p^*(i)$	Mejor subdominio objetivo	-
$F(\Pi_{CC})$	Función de coste del problema de planificación de PCI	-
$N_{Dot}(i)$	Número total de Radio Dots	-
$N_{Dot/planta}(i)$	Número de Radio Dots por planta	-
$N_{planta}(i)$	Número de plantas en el edificio $i$	-
$S_{planta}$	Área de la planta	m <sup>2</sup>
$Dot_{cov}$	Área de cobertura del Radio Dot	m <sup>2</sup>
$N_b$	Número de edificios en el área bajo estudio	-
$K_{DU}$	Coste monetario de DU	-
$K_{fiber}$	Coste monetario de fibra por unidad de medida	-
$d_{ij}$	Distancia entre los edificios $i$ y $j$	m
$X_{ij}$	Variables de decisión binaria para la asignación IRU-DU	[0,1]
$B_{aw}$	Número máximo de DUs por IRU	-
$C_{cov}$	Ganancia de cobertura	-
$C_{cap}$	Ganancia de capacidad	-
$C_{coste}$	Coste de la implementación	-
$\omega_{cov}$	Factor de prioridad de cobertura	-
$\omega_{cap}$	Factor de prioridad de capacidad	-
$\omega_{cost}$	Factor de prioridad de coste de implementación	-

---

$\gamma_k$	SINR de la subportadora $k$	dB
$P(k)$	Perfil de potencia de desvanecimiento selectivo en frecuencia	dBm

# Introducción

En este capítulo inicial se introduce el trabajo realizado en esta tesis. Primero, se describe la motivación de la investigación realizada y se justifica la relevancia de los temas tratados. Posteriormente, se presentan los objetivos principales de la investigación y la metodología de trabajo seguida. El capítulo concluye con la descripción de la estructura general de esta memoria.

## Motivación

En los últimos años, se ha producido una evolución rápida y continua de las tecnologías en el campo de las comunicaciones móviles. Con ello, se pretende hacer frente al crecimiento exponencial de la demanda de tráfico causado por la generalización del uso de internet y de las aplicaciones móviles. Este crecimiento ha forzado a los operadores a desarrollar su capacidad de adaptación para satisfacer las necesidades de los usuarios, dando soporte a esta demanda a la vez que se mantiene una adecuada calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS). Esto sólo se consigue si las redes utilizan el espectro de forma eficiente, se comportan de manera fiable y proporcionan al usuario una velocidad de acceso acorde a la demanda [4].

Fruto de esta evolución, se han ido sucediendo distintas tecnologías de acceso radio móvil, desde *Global System for Mobile communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) hasta *Long Term Evolution* (LTE). LTE fue descrita por primera vez en [5], donde se proyectaba como una mejora respecto a los sistemas anteriores, aportando mayores tasas de transmisión de datos, menor latencia y consumo de potencia, mayor flexibilidad en el uso del espectro y una arquitectura de red simplificada. En los últimos años, el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [6] ha concluido la definición del estándar que supone la evolución de LTE, conocido como *LTE-Advanced*. Estos nuevos sistemas han

supuesto la llegada a la cuarta generación (4G) de los sistemas de comunicaciones móviles.

Los requisitos que debe cumplir un sistema para considerarse 4G según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*, ITU) son:

- a) tasas de transmisión datos máximas de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente,
- b) capacidad para soportar al menos 200 usuarios activos por celda,
- c) retardo en el plano de datos de usuario inferior a 5 ms,
- d) optimización de la capacidad de gestión de la movilidad,
- e) flexibilidad en el espectro para disponer de anchos de banda variables según el servicio y el uso de diversas bandas de frecuencia, y
- f) mejora de la calidad de servicio extremo a extremo.

Para dar respuesta a estos requisitos, en LTE se implementan las siguientes técnicas:

- a) técnicas de modulación multiportadora,
- b) técnicas OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) en el enlace descendente,
- c) técnicas SC-FDM (*Single Carrier Frequency-Division Multiplexing*) en el enlace ascendente,
- d) técnicas de *beamforming*, que permiten crear haces de cobertura estrechos dirigidos a usuarios concretos mediante herramientas software,
- e) técnicas multiantena, que permiten trabajar con dos o más antenas en el transmisor y el receptor, mejorando el rendimiento del enlace mediante la combinación de señales,
- f) antenas inteligentes, que permiten optimizar los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés del entorno a partir de agrupaciones de antenas y un procesamiento digital de señal (*Digital Signal Processing*, DSP),

- g) soporte a duplexaciones en tiempo y frecuencia,
- h) flexibilidad en el uso de bandas de frecuencia, y
- i) tendencia al uso de una arquitectura de red plana.

En la actualidad, se definen las características de los futuros sistemas de quinta generación (5G) [7]. Entre las nuevas funcionalidades, destacan la necesidad de soportar un gran número de dispositivos conectados y una mayor eficiencia energética para servir de base a la Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT). En estas aplicaciones, serán de vital importancia la optimización del canal ascendente y el despliegue de redes heterogéneas/ultra densas.

Toda esta tecnología desarrollada para optimizar el rendimiento y la flexibilidad del sistema lleva aparejado un aumento considerable de la complejidad de las redes. Este incremento de complejidad y tamaño de las redes móviles actuales dificulta mucho las labores de gestión de red [8]. Como consecuencia, los procesos tradicionales seguidos para configurar y optimizar las redes, en su mayoría manuales, deben automatizarse. En este contexto, es vital para el operador introducir funcionalidades que permitan la gestión automática de la red. De esta forma, se reducen los costes de operación (*Operational Expenditures*, OPEX), a la vez que se mejora el rendimiento de la red, retrasando la necesidad de ampliar los recursos de red, y, con ello, las inversiones de capital (*Capital Expenditures*, CAPEX).

Por todo ello, la gestión automática de red se ha convertido en uno de los temas de investigación más importantes en el ámbito de las comunicaciones móviles [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Al mismo tiempo, los organismos de estandarización han centrado sus esfuerzos en especificar las capacidades de funcionamiento automático de las redes móviles, agrupadas bajo el término de redes auto-organizadas (*Self-Organizing Networks*, SON) [15, 16]. La funcionalidad SON incluye capacidades tales como la autoplanificación (o autoconfiguración), la autooptimización (o autoajuste) y la resolución automática de problemas (o autocuración), que se realizan con mínima intervención humana.

En la fase de despliegue, cuando se introduce una nueva estación base (eNodeB, E-UTRAN Node B) en el sistema, debe establecerse la configuración inicial de sus parámetros. Estos parámetros pueden ser de naturaleza física, como, p.ej., el ángulo de orientación de la antena o la potencia de las señales de referencia (pilotos), o de naturaleza lógica, como parámetros de gestión de recursos radio

tan importantes como los umbrales y los márgenes de traspaso. Algunos de estos parámetros presentan un juego de valores discretos, que deben reutilizarse a lo largo de la red. Ejemplos de estos parámetros discretos son las frecuencias en GSM [17], los códigos de aleatorización en UMTS [18] o los identificadores de celda en LTE [19].

Al mismo tiempo, cada elemento de red debe asignarse a uno o varios nodos de nivel superior, estableciendo una estructura de red jerárquica para asegurar la interconexión con otras redes [20]. Ejemplos de este proceso de asignación es la asignación de estaciones base a unidades de control de paquetes [21], emplazamientos a controladores de estación base [22] o celdas a áreas de seguimiento [23].

Este trabajo se centra en dos casos particulares de los citados anteriormente: (a) la planificación de identificadores de celda y (b) el agrupamiento de celdas por emplazamientos para la compartición de equipos físicos. Ambos procesos tienen un gran impacto en el rendimiento de las redes celulares, por su influencia en la calidad de servicio.

Por una parte, el identificador de celda de la capa física (*Physical Cell Identifier*, PCI) es uno de los principales parámetros a configurar en las estaciones base de LTE (eNodeB, eNB) [24]. El PCI es un código numérico, conocido como identificador de capa 1, que se utiliza para diferenciar las estaciones base en funciones asociadas a la movilidad, tales como la reelección de celda o el traspaso<sup>1</sup>. Existen 504 valores posibles de PCIs, que deben reutilizarse a lo largo de toda la red. El principal objetivo de la planificación de PCI es asignar un valor de PCI a cada celda de forma que celdas próximas no compartan el mismo valor de PCI. Este objetivo lo contemplan la mayoría de herramientas de planificación de red actuales. Sin embargo, la asignación de este identificador también tiene un impacto directo en el rendimiento tanto del enlace ascendente como descendente de LTE a través de las señales de referencia de LTE, que debe considerarse a la hora de realizar una correcta planificación de PCI. En la bibliografía, los estudios anteriores solo evalúan de forma cualitativa la influencia que la asignación de PCIs tiene en los problemas que surgen al identificar la celda. Así, ningún trabajo ha evaluado de manera cuantitativa el impacto que esta planificación tiene sobre el rendimiento del enlace ascendente y descendente de LTE. De igual forma, ningún

---

<sup>1</sup>No debe confundirse el PCI, que es un número entre 0 y 503, compartido entre diferentes celdas del sistema, con el identificador global de celda extendido (*Extended Cell Global Identifier*, ECGI), que es único para cada celda de la red [24]. Por brevedad, de aquí en adelante se utilizará el término identificador de celda para referirse al PCI.

estudio anterior ha propuesto un método de planificación de PCI que tenga en cuenta conjuntamente tanto los problemas de identificación de la celda como su influencia en el enlace ascendente y descendente de LTE.

Del mismo modo, en la fase de planificación, se define la estructura jerárquica de la red, asignando elementos de red a controladores o áreas de control. En el caso de las redes LTE heterogéneas, que integran celdas pequeñas (*small cells*), debe realizarse el agrupamiento de celdas en emplazamientos. El término celda pequeña hace referencia a celdas de corto alcance que operan en frecuencias bajo licencia del operador celular. Bajo este término, se agrupan celdas pequeñas en entornos residenciales, en entornos corporativos, en estaciones de metro o en zonas rurales. Compartiendo parte de los equipos físicos de estos emplazamientos, se consigue optimizar el rendimiento de los mismos a la vez que se reduce la inversión en infraestructura.

## Objetivos de la Tesis

El objetivo fundamental de esta Tesis es el desarrollo de algoritmos automáticos de planificación para redes LTE que puedan implementarse en herramientas comerciales de planificación de red. En concreto, los objetivos perseguidos en este trabajo son:

- a) desarrollar métodos de planificación de identificadores de celda en redes LTE que consigan optimizar el rendimiento tanto del enlace ascendente como del descendente, y
- b) desarrollar métodos de asignación de emplazamientos para celdas pequeñas en redes LTE mediante técnicas de agrupamiento, que consigan incrementar el rendimiento del sistema y reducir los costes asociados a su implementación.

Como denominador común, ambos problemas se formulan como problemas de agrupamiento, que pueden resolverse mediante teoría de grafos.

A continuación se resumen las principales contribuciones de esta tesis:

- a) En el problema de asignación de PCIs, se evalúa de forma cuantitativa el impacto de la asignación de PCIs sobre el rendimiento del enlace tanto descendente como ascendente de LTE. Para ello, se desarrollan sendos modelos

analíticos que permiten caracterizar los niveles de interferencia en ambos enlaces en función del plan de asignación de PCIs.

- b) Del estudio anterior, se extraen los requisitos que debe cumplir un buen plan de PCIs. A partir de dichos requisitos, se propone una formulación novedosa del problema de asignación de PCIs, que combina los requisitos del enlace ascendente y descendente. A diferencia de estudios anteriores, el problema de coloración de grafos subyacente se reformula como un problema de partición de grafos, para el que se adaptan por primera vez algoritmos heurísticos descritos en la bibliografía.
- c) En el problema de asignación de emplazamiento a celdas pequeñas mediante agrupamiento de recursos en redes LTE, se formula por primera vez el problema mediante teoría de grafos. Se presentan dos métodos para resolverlo: un método exacto, basado en un enfoque enumerativo, y un método aproximado, basado en la combinación de varias estrategias heurísticas.

Un aspecto distintivo de este trabajo es la consideración de aspectos prácticos que suelen obviarse. Todos los modelos o métodos que se proponen se han diseñado para incluirse en una herramienta de planificación celular comercial (*Ericsson Cell Optimizer*). Esta condición de partida obliga a que los métodos sean sencillos y computacionalmente eficientes. Igualmente, otro aspecto importante es que todos los métodos propuestos han sido validados con datos de redes LTE reales, proporcionados por diversos operadores.

## Metodología de trabajo

A continuación se describe la metodología genérica adoptada para abordar los problemas en esta tesis:

- a) El trabajo se inicia con una descripción cualitativa del problema, realizada directamente por el operador de red. En ella, se contextualiza el problema, estableciendo su formulación matemática e identificando sus variables de decisión y sus principales indicadores de rendimiento. Una vez formulado el problema, se revisa la literatura existente en el tema, para evaluar el estado de la técnica y la tecnología.

- b) El análisis teórico preliminar permite analizar las propuestas anteriores para identificar sus carencias, de forma que se pueda aportar una nueva solución al problema.
- c) Estas limitaciones se confirman mediante el modelado analítico del problema y el uso de herramientas de simulación desarrolladas en Matlab, calibradas con datos reales obtenidos a partir de pruebas de campo en redes LTE comerciales.
- d) A partir de los hallazgos del análisis preliminar, se diseñan nuevos algoritmos de planificación de red, que constituyen la principal contribución de esta tesis, basados en teoría de grafos. Dicho diseño se realiza de forma iterativa, partiendo de una solución inicial, que posteriormente se simplifica y se refina para mejorar su eficiencia computacional. En el proceso, se hace uso de técnicas clásicas de partición de grafos, implementadas mediante rutinas desarrolladas anteriormente, adaptadas para el problema en cuestión.
- e) En una primera fase de prueba, para facilitar la validación de los algoritmos de teoría de grafos resultantes, se utilizan grafos pequeños diseñados para este objetivo. Posteriormente, se extienden las pruebas a grafos grandes que simulan redes reales.
- f) Una vez validados los algoritmos, se utilizan los datos de red para configurar escenarios realistas sobre los que simular condiciones extremas, lo que sirve para poner de manifiesto las limitaciones de los métodos existentes y establecer una cota superior del beneficio obtenido por los métodos de planificación.
- g) Finalmente, se validan los métodos de planificación mediante el uso de las herramientas de simulación calibradas con datos de configuración y rendimiento obtenidos de una red real.

Tanto para el funcionamiento como para la validación de las soluciones propuestas, se utilizan datos de configuración y rendimiento de redes reales. Por ello, el estudio de la información suministrada por el fabricante, la construcción, las consultas y el manejo de la información de las bases de datos del operador han sido tareas importantes en el desarrollo de esta tesis.

## Estructura del documento

Como puede deducirse de los objetivos planteados, el cuerpo de este documento se organiza en dos partes, que cubren cada uno de los objetivos por separado. Por claridad, ambas partes mantienen una estructura similar.

En el Capítulo 1 se presenta el marco conceptual de esta tesis, revisando los conceptos necesarios para contextualizar este trabajo. Para ello, se introduce el problema de la planificación automática de red. Al mismo tiempo, se revisan los conceptos básicos de la tecnología celular LTE para facilitar el seguimiento del resto de capítulos.

Los Capítulos 2 y 3 corresponden a los objetivos principales de esta tesis. El Capítulo 2 aborda la planificación automática de identificadores de celda en redes LTE, mientras que el Capítulo 3 se centra en el desarrollo de algoritmos de agrupación de celdas pequeñas en emplazamientos en redes celulares heterogéneas.

En el Capítulo 4 se exponen las conclusiones del trabajo realizado, destacando las principales contribuciones originales y las posibles líneas de continuación del trabajo.

Como complemento, se incluyen dos anexos que describen con detalle las herramientas de simulación empleadas, que han sido adaptadas como parte del trabajo de esta tesis. En el Apéndice A, se describe el simulador dinámico utilizado para evaluar el impacto de la planificación de identificadores de celda en el enlace descendente. En el Apéndice B se detalla el simulador estático utilizado tanto para evaluar los métodos de planificación de identificadores de celda en el enlace ascendente descritos en el Capítulo 2, como para validar los métodos de agrupamiento de celda propuestos en el Capítulo 3.

# Capítulo 1

## Planificación automática de parámetros en redes LTE

En este primer capítulo se presentan los conocimientos básicos necesarios para comprender el resto del documento. Con ello, se pretende contextualizar el trabajo realizado en el marco de la planificación automática de redes LTE. En la sección 1.1, se describe el estándar de comunicaciones móviles LTE, describiendo la arquitectura de referencia y su funcionalidad básica. A continuación, en la sección 1.2, se presentan los conceptos básicos de planificación y automatización de redes móviles.

### 1.1. Estándar LTE

En esta sección se presentan los elementos y funcionalidades que componen un sistema LTE típico. En primer lugar, se describe la arquitectura de red, para posteriormente detallar las funciones de cada una de las capas del sistema.

#### 1.1.1. Arquitectura de red

Como todo sistema de comunicaciones móviles, las redes LTE están constituidas por tres elementos básicos: terminal móvil, red de acceso y red troncal. En el caso de LTE, la red de acceso se conoce como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access* (E-UTRAN) y la red troncal se conoce como *Evolved Packet Core* (EPC).

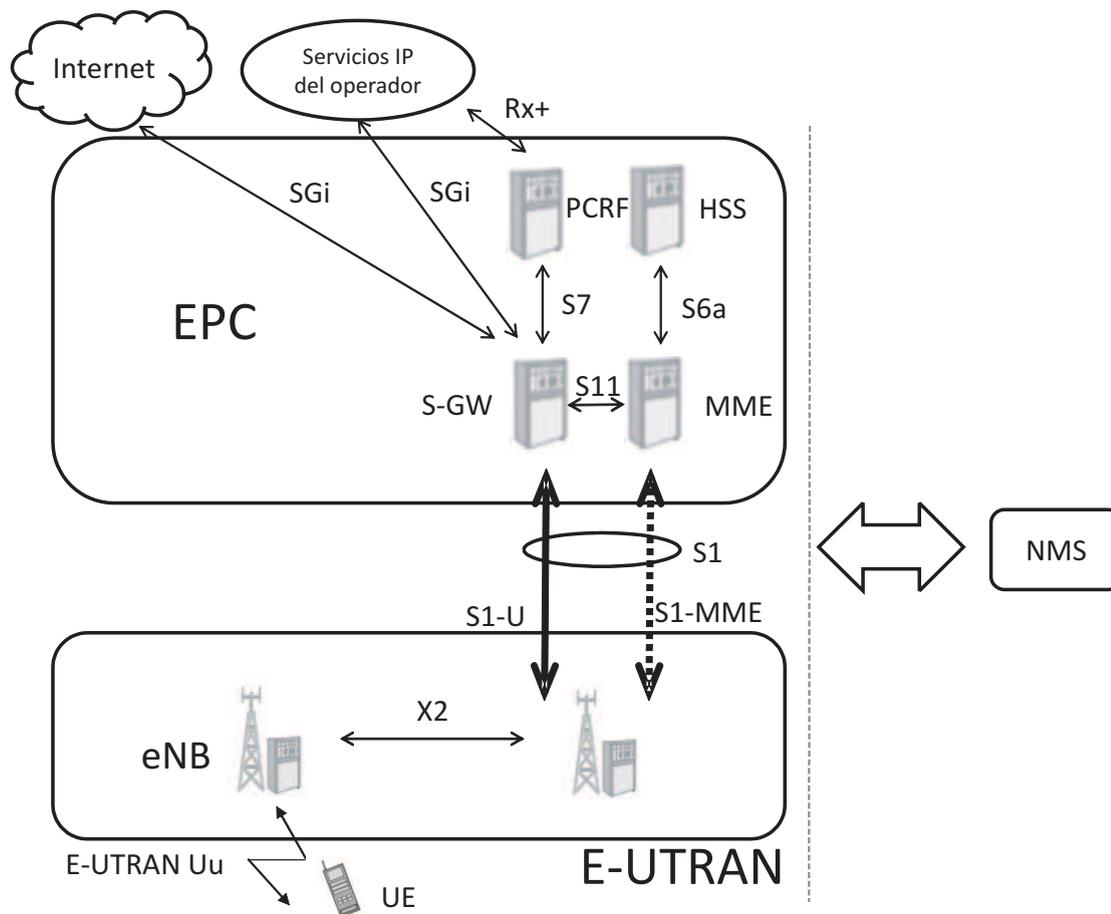


FIGURA 1.1: Arquitectura básica de red LTE.

La Fig. 1.1 muestra la arquitectura básica de referencia de una red LTE. En ella, se observan los elementos de los distintos segmentos de la red, así como las interfaces entre los mismos descritos en el estándar [25].

Estos elementos son:

1. *User equipment*, UE. Se encarga de proveer al usuario de una interfaz para acceder a los servicios sobre la red LTE. Por esta interfaz viajan tanto los datos de control como los datos de usuario. La información transportada por los canales de control será con la que se configure la comunicación en los enlaces radio en ambas direcciones (ascendente, del UE al eNB, y descendente, del eNB al UE). En esta información puede ir el control de potencia del terminal o el esquema de modulación y codificación seleccionado para la transmisión de datos.

Entre los elementos de la red de acceso, se encuentran:

1. *Evolved-NodeB*, eNB. En las redes LTE, a diferencia de redes anteriores, este elemento se encarga de gran parte de la gestión de recursos radio. Los eNBs pueden comunicarse entre sí mediante interfaces X2, generalmente sin necesidad de niveles superiores, lo que permite que la gestión de trasposos de llamadas y la coordinación entre eNBs se realice en esta capa.

La comunicación entre la E-UTRAN y la EPC se realiza mediante la interfaz S1. Los elementos que forman esta red troncal son:

1. *Mobility Management Entity* (MME). Este elemento es la entidad de gestión de movilidad, encargada de procesar la información de señalización entre los usuarios y la red troncal. Entre las principales funciones de la entidad MME, se encuentran la autenticación y autorización de acceso de los usuarios, y la gestión de la señalización necesaria para el envío de paquetes entre los equipos de usuario y la red externa.
2. *Serving Gateway* (S-GW). Este elemento actúa de enlace entre la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC en el plano de usuario. Es el punto de referencia en la red troncal para el usuario cuando éste se mueve entre distintas estaciones base.
3. *Packet Data Network Gateway* (P-GW). Este elemento es el encargado de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Entre las funcionalidades principales de esta entidad, se encuentran el filtrado de paquetes por usuarios y la asignación de direcciones IP.
4. *Home Subscriber Server* (HSS). Este elemento se encarga de controlar la suscripción local, llevando a cabo el registro y la autenticación de los usuarios por parte del operador.
5. *Policy and Charging Rules Function* (PCRF). Este elemento es el encargado de la función de control de las reglas y políticas de calidad de servicio del operador.

Como se aprecia en la Fig. 1.1, en LTE se tiende a una arquitectura de red plana (es decir, no jerárquica), eliminando en la medida de lo posible nodos intermedios. Con ello, se pretende obtener una mayor interacción entre los elementos de la red, dándole una mayor funcionalidad a cada uno de ellos y eliminando la

TABLA 1.1: Canalización en el sistema LTE.

Ancho de banda del sistema (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

gestión centralizada. En la figura, también aparece el elemento *Network Management System*, NMS. Éste se encarga de la monitorización de todos los elementos de la red, comprobando su estado de configuración y recopilando las medidas de rendimiento.

El trabajo presentado en esta memoria afecta exclusivamente a las funcionalidades de la red de acceso de LTE. Por esta razón, en lo sucesivo en esta memoria, sólo se hará referencia a las características de E-UTRAN y al elemento NMS, de donde se obtiene toda la información necesaria de la red.

### 1.1.2. Nivel físico

La capa física de la interfaz radio del sistema LTE se basa en la técnica de acceso múltiple *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) en el enlace descendente y *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) en el enlace ascendente.

Para el enlace descendente, la técnica OFDMA permite que múltiples usuarios puedan compartir el espectro disponible distribuyendo la información en un conjunto de subportadoras multiplexadas y ortogonales entre sí para la transmisión simultánea de un conjunto de símbolos. La ventaja principal de esta técnica reside en su robustez frente a los desvanecimientos de señal causados por la propagación multicamino, típicos del entorno celular.

En el caso del enlace ascendente, la técnica de acceso múltiple SC-FDMA es similar a OFDMA, pero realizando un procesado previo de los símbolos que se transmiten, reduciéndose así las variaciones de potencia instantánea y consiguiendo una técnica de transmisión de portadora única. En ambos casos, la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 kHz. El número de subportadoras disponibles varía en función del ancho de banda del sistema, tal como se indica en la Tabla 1.1.

La Fig. 1.2 muestra la estructura general de recursos físicos en LTE. En el eje horizontal se representa el dominio temporal, separado en intervalos temporales,

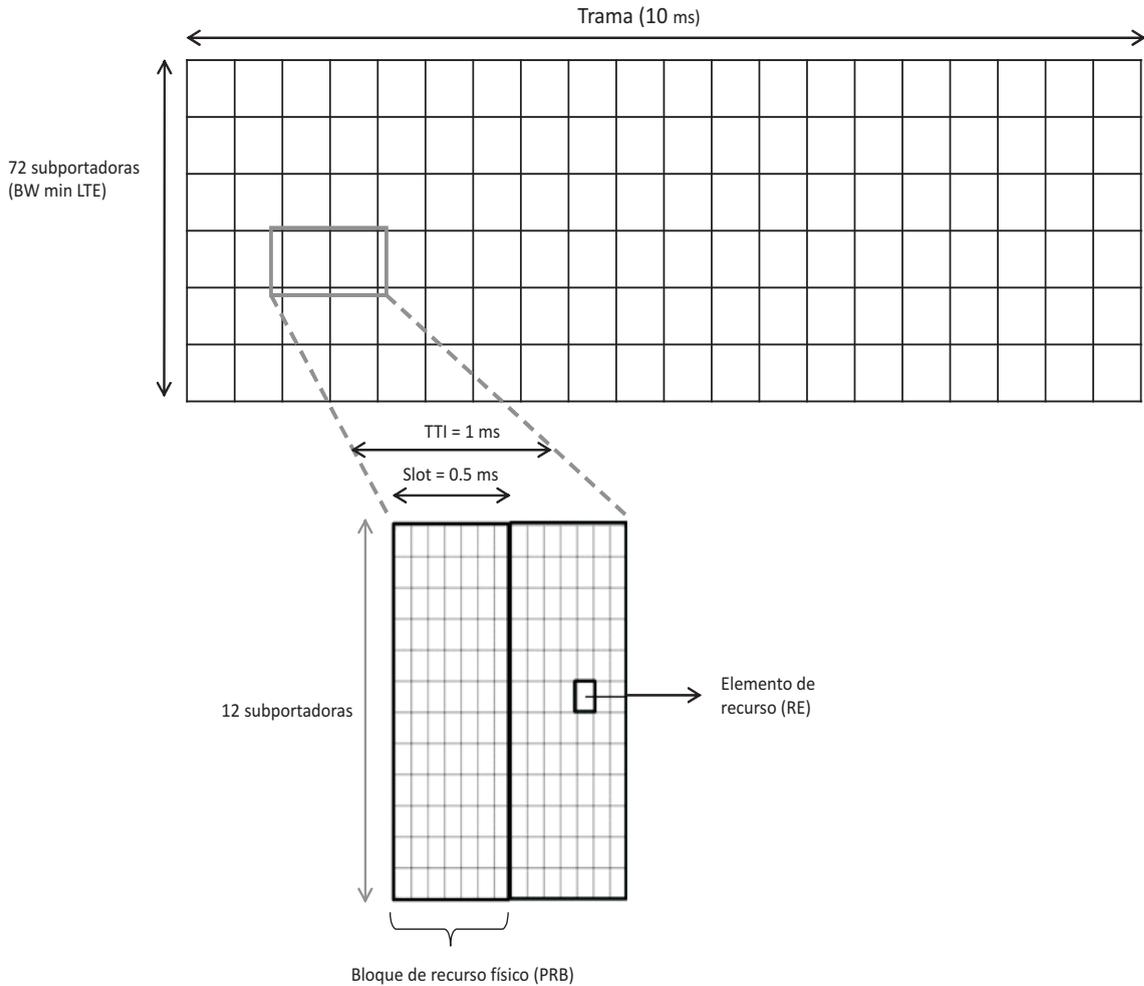


FIGURA 1.2: Estructura de recursos en LTE (caso de prefijo cíclico normal).

mientras que en el vertical se presenta el dominio frecuencial, con las 72 subportadoras que forman el ancho de banda mínimo de LTE. La unidad mínima en la que se cuantifican los recursos radio, definida como elemento de recurso (*Resource Element*, RE), está constituida por una subportadora durante un tiempo de símbolo,  $T_s$ . Por su parte, la unidad mínima de asignación de recursos en la interfaz radio es el bloque de recursos físicos (*Physical Resource Block*, PRB). Un PRB ocupa 180 kHz de banda, equivalente a 12 subportadoras equiespaciadas 15 kHz entre ellas, que se extienden por un periodo (o ranura temporal, *slot*) de 0.5 ms. En dicho intervalo, se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico utilizado. La planificación de la asignación de recursos puede llegar a realizarse con una resolución temporal de 1 ms, denominado *Transmission Time Interval*, TTI, o subtrama temporal. El número de PRBs disponibles depende del ancho de banda del sistema, tal como se observa en la Tabla 1.2.

TABLA 1.2: Capacidad de un sistema LTE.

Ancho de banda del sistema (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Número de PRBs disponibles	6	12	25	50	75	100

La capa física del sistema LTE está pensada para operar en bandas altas de UHF (*Ultra High Frequency*), entre 450 MHz y 3.5 GHz. De hecho, el estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando en modo de duplexión por división de frecuencia (*Frequency Division Duplexing*, FDD) o tiempo (*Time Division Duplexing*, TDD) [24].

Los posibles esquemas de modulación utilizados en LTE son QPSK, 16QAM y 64QAM tanto para el enlace descendente como para el ascendente de LTE.

### 1.1.3. Nivel de enlace

Las funcionalidades más importantes de la capa de enlace de un sistema LTE son la retransmisión híbrida de paquetes, la adaptación del enlace y la asignación dinámica de recursos. Con estas funciones se consigue mejorar la eficiencia del canal, que se traduce en una mayor tasa de transmisión para los usuarios y/o un mayor número de usuarios simultáneos.

- a) La función de retransmisión híbrida de paquetes (*Hybrid Automatic Repeat-request*, HARQ) incluye mecanismos de corrección de errores mediante retransmisiones basados en la redundancia incremental.
- b) La función de adaptación dinámica del enlace (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC) se encarga de seleccionar el esquema de modulación y codificación (*Modulation and Coding Scheme*, MCS) más adecuado para cada usuario según las condiciones del canal en cada instante de tiempo. Para ello, se estiman las condiciones del canal radio que percibe cada usuario. En base a dicha estimación, a aquellos usuarios que experimenten condiciones mejores de canal se les asignan MCS más eficaces, que permiten tasas de transmisión más altas. Por contra, a aquéllos que tengan peores condiciones de canal, se le asignan MCS más robustos, a costa de una tasa de transmisión inferior.
- c) La función de asignación dinámica de recursos (*Packet Scheduling*) se encarga de la asignación de los recursos radio disponibles a los distintos usuarios cada

TTI (1 ms). Esta asignación implica decidir qué usuarios transmiten y cuáles no, y con qué recursos de la interfaz radio (es decir, recursos en frecuencia y tiempo). En dicha asignación, se trata de dar más recursos a aquellos usuarios que hagan un uso más eficiente de los mismos, pero intentando, en la medida de lo posible, una cierta equidad entre los usuarios.

#### 1.1.4. Capa de red

Entre las funcionalidades de la capa de red de LTE, cabe destacar la (re)selección de celda, el traspaso y el control de admisión.

- a) La función de selección de celda determina la celda en la que debe acampar un terminal que no tiene conexión activa. Esta selección entre celdas se realiza en base al nivel de señal que el terminal recibe desde las distintas celdas. Una vez definida la celda de acampada, el terminal puede cambiar de celda mediante el proceso de reelección de celda. El criterio que se utiliza para la reelección se basa en el nivel de señal recibido por el terminal desde la celda servidora. Si dicho nivel es aceptable, el terminal no realiza ningún cambio de celda. En cambio, si este nivel cae por debajo de un umbral y el terminal recibe con mayor nivel otra celda, se lleva a cabo el cambio de celda de acampada.
- b) La gestión de la movilidad cuando un terminal se encuentra en modo conectado se lleva a cabo a través del proceso de traspaso (*Handover*, HO). Mediante el traspaso entre celdas, se pretende mantener la calidad de la llamada cuando el usuario se desplaza. Existen diferentes algoritmos de traspaso en función del objetivo que se busque con los cambios de terminales entre celdas. Estos algoritmos no están estandarizados, sino que son propios de cada fabricante. Aun así, como norma general, se busca que el usuario esté siempre conectado a la celda que le ofrezca mayor nivel de señal.
- c) Los criterios de admisión de llamadas pretenden regular el acceso a los recursos para garantizar la calidad de servicio de las conexiones existentes, de forma que éstos determinan la experiencia del usuario en la red una vez establecida la conexión. Por lo tanto, unos criterios de admisión demasiado exigentes provocan un bloqueo innecesario de peticiones, aunque en la red las llamadas aceptadas experimentarían buenas tasas de transmisión. Por el

contrario, unos criterios demasiado laxos consiguen una tasa de bloqueo de conexión muy baja a costa de que los usuarios con conexión activa experimenten condiciones adversas debido a la falta de recursos en la red.

## 1.2. Planificación automática de redes móviles

La planificación de la red de acceso radio se encarga de la definición de las áreas de servicio de cada estación base, el control de la interacción entre estaciones base adyacentes y la estimación de la capacidad del canal radio experimentado por los usuarios de cada estación base.

El proceso de planificación radio [12] comienza con la definición de los criterios de diseño, especificando los requisitos de cobertura, calidad de conexión y capacidad, que pueden diferir dependiendo de la región geográfica. Con esos requisitos, se realiza el proceso de **preplanificación**, en el que se construyen los planes teóricos de cobertura y capacidad. El plan de cobertura incluye la definición de las áreas de cobertura, las probabilidades de servicio y los niveles de señal objetivo, mientras que el plan de capacidad incluye el perfil de usuarios y tráfico en las áreas de cobertura. En esta fase de preplanificación se realiza el proceso de dimensionado, que permite estimar el número de emplazamientos necesarios a partir de estimas del radio máximo y la capacidad máxima de celda. A continuación, en la fase de **planificación nominal** se busca y se selecciona la ubicación de los emplazamientos donde se sitúan las estaciones base. Con esa información, se determina el área de servicio de cada celda, que permite realizar los cálculos de propagación con los que estimar los niveles de señal deseada e interferencia y la calidad de conexión ofrecida al usuario. Posteriormente, en la fase de **planificación detallada**, se establece la configuración inicial de parámetros de los algoritmos de gestión de recursos radio y se fija la máxima carga de cada celda. El resultado final de la planificación radio son los planes de cobertura, las estimas de capacidad, los planes de interferencia, los balances de potencia, los planes de frecuencia y el plan de parámetros. Estos planes se mejoran en la fase de operación, cuando se dispone de medidas de la red real.

La fuerte competencia entre operadores conlleva el reto de proveer servicios de alta calidad a la vez que se reducen los costes de inversión y operación. Así, es importante incrementar el rendimiento de la red con la infraestructura existente,

retrasando cuanto sea posible la inversión en nuevo equipamiento o funcionalidad de red. Esto puede conseguirse mediante la optimización de los parámetros de red. Incrementar el rendimiento de la red significa para el operador mejorar el área de cobertura o la capacidad en términos de número de usuarios, a la vez que se reduce la tasa de bloqueo y la tasa de pérdida de conexión para el usuario.

Una de las estrategias más habituales para optimizar una red celular es la reconfiguración de sus parámetros basada en medidas recogidas durante la fase de operación. Cuando esta estrategia se realiza empleando modelos de la red construidos con medidas estadísticas, recibe el nombre de replanificación de red basada en medidas. Con este fin, se obtienen medidas de la red con las que se calibran los modelos de propagación, se adaptan e implementan modelos de movilidad y se derivan modelos de capacidad mediante técnicas de regresión o modelos de predicción.

La replanificación puede realizarse de forma reactiva o proactiva. En la estrategia de planificación reactiva, los ajustes se realizan cuando se alcanza algún límite de capacidad (p.ej., cuando ha ocurrido un problema de congestión en una celda) o cuando las condiciones del sistema cambian de forma no prevista (p.ej., cuando se incluyen nuevos equipos de forma temporal para cubrir algún evento o se modifican los parámetros de configuración para solventar un problema inesperado). Como alternativa, una estrategia de planificación proactiva lleva a cabo acciones correctoras antes de que los problemas aparezcan, mediante técnicas de predicción y estimación avanzadas. De esta forma, el operador de red se anticipa a posibles problemas antes de que estos tengan lugar, mejorando, a consecuencia de ello, la calidad del servicio ofrecida a los usuarios.

La tendencia actual en las redes móviles es incrementar las tareas de planificación proactiva. Durante la fase de diseño, una planificación proactiva implica la búsqueda de la mejor configuración inicial de la red, según las condiciones de tráfico y propagación previstas. Durante la fase de explotación, una planificación proactiva requiere detectar posibles cuellos de botella del sistema con antelación a que éstos ocurran. Al mismo tiempo, una estrategia proactiva permite adaptar la configuración de la red a los cambios de topología y condiciones producidos por la expansión de la red y la oferta de servicios. Todas estas tareas solo se pueden llevar a cabo con la ayuda de herramientas de automatización.

El aumento del tamaño y la complejidad de las redes celulares conlleva que las tareas de despliegue, operación y mantenimiento de la red sean cada vez más difíciles para el operador. Para afrontar este problema, surgen las técnicas de automatización aplicadas en redes autoorganizadas (*Self-Organizing Networks*, SON), que consiguen minimizar la intervención humana, reduciendo así los costes de despliegue u operación y eliminando los fallos por errores humanos, y además, consiguen maximizar el rendimiento, al aplicar algoritmos avanzados de gestión de red.

Las capacidades de una red autoorganizada abarcan la autoconfiguración (*self-configuration*), la autooptimización (*self-optimization*) y la autocuración (*self-healing*). Este trabajo queda englobado dentro de la capacidad de autoconfiguración, en la que se engloba la (re)planificación automática de parámetros. La autoconfiguración hace referencia a la capacidad de la red para realizar la puesta en marcha de forma automática de un nuevo elemento de la red.

Los casos de uso más importantes definidos en el ámbito de la autoconfiguración de LTE son [8] [26] [27]:

- a) Generación automática de la lista de vecinas.
- b) Configuración automática de parámetros radio (p.ej., potencia de transmisión de la estación base, ángulo de apuntamiento de la antena o parámetros de algoritmos de gestión de recursos radio).
- c) Configuración de la conexión de la celda mediante la red de retorno (red de transmisión).
- d) Configuración del identificador de celda.
- e) Ubicación y compartición de equipos físicos en emplazamientos.

A la hora de implementar funcionalidades SON, se plantean dos alternativas según la ubicación de los sistemas que la integran [28]:

- a) En un sistema SON *centralizado*, representado en la Fig. 1.3(a), los métodos SON se ejecutan en un nodo específico, que se añade en la arquitectura de red. Dicho nodo se encarga de recopilar los datos necesarios de la NMS, analizarlos y proponer cambios en la configuración de la red. La propuesta de

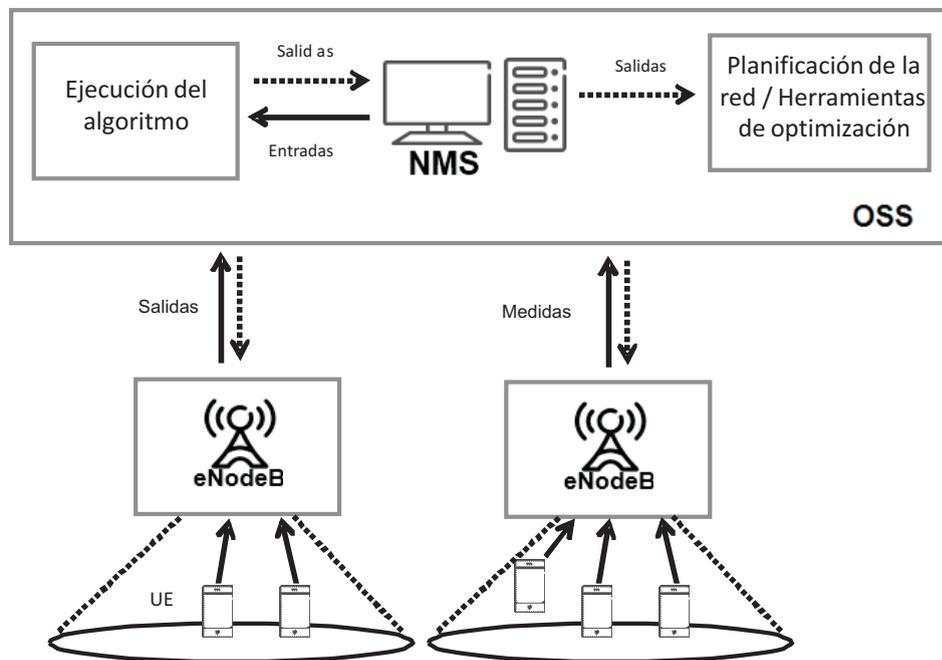
cambios se envía a la NMS, encargada de reenviar esta información al resto de elementos de la red (estaciones base). En la figura, OSS es el sistema de soporte a las operaciones (OSS, *Operations Support Systems*), un tipo de sistema de supervisión de soporte de la red para cualquier tipo de nodo.

- b) Alternativamente, en un sistema SON *distribuido*, representado en la Fig. 1.3(b), se dota a cada estación base de la funcionalidad SON necesaria, que permite funcionar de forma independiente o coordinada con otras entidades del mismo nivel. En este caso, la información necesaria se obtiene periódicamente a través del interfaz X2 entre las celdas adyacentes.

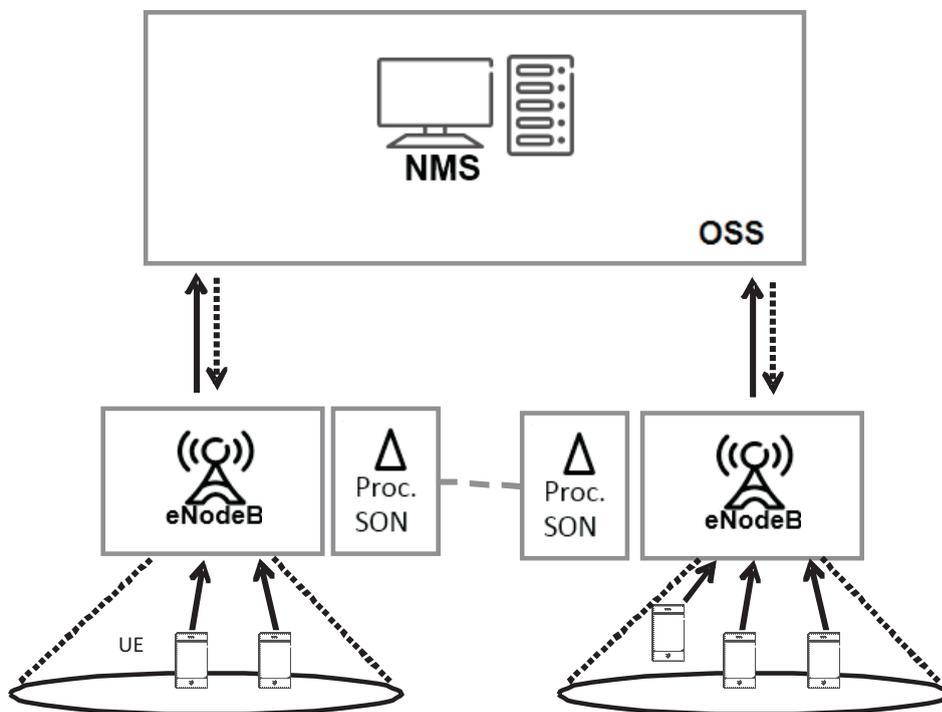
Esta tesis doctoral se centra en dos casos de uso relevantes en el ámbito de la replanificación automática de parámetros en redes LTE, como son la planificación automática de identificadores de celda y la agrupación de celdas por emplazamientos en redes LTE. Los métodos propuestos pueden utilizarse durante el diseño inicial de la red, cuando aún no se disponen medidas, o como parte del proceso de replanificación de la red, cuando ya se dispone de medidas. Para su implementación, se asume una estructura SON centralizada, basada en una herramienta de planificación de red, lo que justifica la atención prestada a la eficiencia computacional de los algoritmos. Aun así, es posible adaptar los métodos propuestos para su ejecución en una estructura SON distribuida, lo que se plantea como línea futura.

El capítulo 2 se dedica a la asignación de identificadores de celda. Para resolver el problema, se construyen modelos de sistema analíticos, que pueden calibrarse con medidas reales de la red, con los cuales se evalúa, mediante el uso de simuladores de nivel de sistema, el impacto de esta planificación en el rendimiento de la red. Posteriormente se resuelve el problema mediante el desarrollo de un algoritmo heurístico basado en teoría de grafos.

El capítulo 3 está dedicado al agrupamiento de celdas en emplazamientos para compartir recursos físicos en redes LTE con celdas pequeñas. Para la resolución de este problema, se propone un método heurístico basado en teoría de grafos que parte de medidas de red. En este caso, dado que las instancias del problema no son excesivamente grandes, es posible desarrollar también un método exacto, que garantice la solución óptima. Para la evaluación y comparación de estos métodos, se recurre igualmente a un simulador.



(a) Arquitectura centralizada



(b) Arquitectura distribuida

FIGURA 1.3: Arquitectura de sistema SON.

## Capítulo 2

# Planificación automática de identificadores de celda en LTE

En este capítulo, se estudia la planificación de identificadores de celda, que tiene un gran impacto en el rendimiento de las redes celulares. Tras analizar el estado de la técnica, se realiza un estudio del impacto de las colisiones de las señales de referencia en el rendimiento tanto del enlace descendente como ascendente. Para ello, se construyen sendos modelos de estos enlaces, que se integran después en herramientas de simulación de nivel de sistema. Una vez planteados los requisitos que debe cumplir un plan adecuado de PCI, se propone un método de planificación de identificadores de celda para una red LTE. El método se basa en las estadísticas de traspasos y medidas de carga disponibles en el sistema de gestión de la red. El objetivo del método es evitar los problemas de colisión y confusión, a la vez que se reducen las colisiones de señales de referencia entre celdas vecinas. A diferencia de trabajos anteriores, el problema se formula considerando tanto las colisiones de señales de referencia en el enlace descendente como en el ascendente de LTE. Para ello, se propone la adaptación de algoritmos clásicos de partición de grafos para resolver el problema de coloración de grafos que hay tras la planificación de PCI. Por último, se presentan los resultados obtenidos por el método propuesto sobre grafos construidos a partir de datos de redes reales y se comentan las conclusiones extraídas del estudio.

## 2.1. Introducción

La planificación de identificadores físicos de celda (o PCIs) en LTE se ha identificado por los operadores como un caso de uso importante de autoconfiguración [27] [28]. El PCI es un identificador de bajo nivel que se utiliza en procesos de movilidad tan importantes, como el traspaso o la reelección de celda [2]. Por ello, es un parámetro de configuración esencial en la interfaz radio.

El número de posibles valores de PCI es limitado, lo que obliga a que varias estaciones base tengan que compartir el mismo valor de PCI. Una asignación incorrecta de PCIs puede causar que dos celdas adyacentes utilicen el mismo valor de PCI (problema conocido como *colisión*), o que una misma celda servidora tenga dos vecinas con el mismo PCI (problema conocido como *confusión*) [15]. En ambas situaciones, el usuario es incapaz de identificar la celda objetivo correctamente, impidiendo que se establezca la comunicación. Por lo tanto, una asignación correcta de PCIs es esencial para prestar el servicio adecuadamente. Sin embargo, esta asignación no es una tarea trivial debido a que el número de celdas en la red es mucho mayor que el número de PCIs disponibles.

Además de identificar a las celdas, el PCI determina diversos aspectos relacionados con las señales de referencia. En el enlace descendente, el PCI fija la ubicación de las señales de referencia (*Cell-Specific Reference Signals*, CRS, vulgarmente conocidas como pilotos) dentro de la estructura tiempo-frecuencia de los recursos que forman un PRB [24]. Estas señales de referencia, utilizadas para demodular los canales físicos del enlace descendente y estimar las condiciones del canal, se transmiten en subportadoras distintas según el valor de PCI asignado a la celda. Así, cada celda tiene un patrón de señales de referencia específico relacionado con su PCI. El número de patrones diferentes depende de la configuración de antena, pero es siempre menor que 6 [24]. Por ello, es habitual que celdas cercanas compartan la posición de las señales de referencia, aunque tengan valores distintos de PCI. Estas colisiones degradan las estimas de las condiciones de canal reportadas por el terminal (p.ej., el nivel de calidad de señal piloto), en las que se basa el eNodeB para seleccionar un esquema de modulación y codificación adecuado en el enlace descendente. Así, un plan inadecuado de asignación de PCI puede llevar a estimaciones de canal imprecisas, lo que conlleva transmisiones de datos ineficientes en el canal descendente [29].

En el canal ascendente, el PCI define el grupo de señales de referencia o códigos (*Demodulation Reference Signals*, DM RS) empleados por la estación base para la estimación de canal y demodulación coherente en el canal compartido del enlace ascendente (*Physical Uplink Shared Channel*, PUSCH) y en el canal de control del enlace ascendente (*Physical Uplink Control Channel*, PUCCH) [24]. Si dos usuarios de celdas diferentes usan el mismo código de demodulación, el proceso de decodificación en el PUCCH o PUSCH se degrada, lo que puede causar que la estación base no pueda identificar correctamente al usuario. Como consecuencia, se degrada la tasa de transmisión en el enlace descendente y se incrementa el retardo de transmisión debidos a retransmisiones. En el PUCCH, esta pérdida de rendimiento puede ser crítica, ya que está directamente ligada al rendimiento del enlace descendente. Si este canal de control deja de funcionar, se dejan de reportar las medidas de CQI, afectando negativamente al rendimiento del enlace descendente de aquellos usuarios que no estén haciendo uso del PUSCH.

### 2.1.1. Trabajo relacionado y contribución

La mayoría de los estudios existentes en la bibliografía sobre planificación de identificadores de celda se han orientado únicamente a evitar los problemas de colisión y confusión causados por la reutilización de los códigos [19] [30] [31]. Para evitar estos dos problemas, la planificación de PCI puede formularse como un problema de coloración de grafos [32], que puede resolverse con algoritmos específicos basados en la teoría de grafos (p.ej., algoritmos voraces [19] [30]) o con algoritmos de optimización de propósito general (como, p.ej., recocido simulado [33], búsqueda tabú [34] o programación lineal [35]).

Los estudios preliminares consideran esquemas de planificación de PCI centralizados [36], mientras que estudios más recientes evalúan versiones distribuidas de los mismos algoritmos [37] [30] [36] [38]. En los últimos trabajos, se ha extendido el análisis de la planificación de PCIs a redes LTE heterogéneas, formadas por varias capas, considerando los problemas de colisión y confusión entre las celdas de diferentes capas [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45]. También, estudios recientes han extendido el caso de uso de planificación de PCI a escenarios emergentes con alta relevancia para 5G, como, por ejemplo, el caso de redes multioperador [46] y escenarios de redes ultra densas [47].

En pocos estudios se ha considerado el impacto de la asignación de PCI en la ubicación de las señales de referencia del enlace descendente. Sólo en [48], se propone un método trivial de planificación de PCI que reduce las colisiones de CRS entre celdas adyacentes del mismo emplazamiento. En él, no se comprueba la existencia de colisiones de CRS entre celdas vecinas de diferentes emplazamientos, que en la mayoría de los casos son las principales celdas interferentes y serán las que tengan un impacto mayor en el rendimiento del canal descendente. Además, ningún estudio evalúa el impacto de la asignación de PCI en el rendimiento del enlace ascendente. En los sistemas de comunicaciones celulares desplegados hasta la fecha, el enlace descendente ha sido el enlace más restrictivo en términos de capacidad. Sin embargo, el enlace ascendente será crítico en las futuras redes 5G a la hora de cumplir los exigentes requisitos de cobertura y capacidad en el contexto de la Internet de las cosas (IoT) [49]. Ello justifica la necesidad de evaluar el impacto de la asignación de PCIs en el rendimiento del enlace ascendente de LTE.

Hasta donde se sabe, no se ha propuesto hasta la fecha ningún método de planificación de PCI que considere conjuntamente las colisiones de las señales de referencia tanto del canal ascendente como descendente de LTE, a la vez que se evitan los problemas de colisión y confusión.

Igualmente, los métodos clásicos de planificación de PCI a menudo dependen de algoritmos heurísticos de coloración de grafos, que deben diseñarse desde cero, con el consiguiente esfuerzo de desarrollo. Además, los métodos de planificación de PCI existentes se basan en estimaciones realizadas mediante herramientas de planificación de red, con lo que no aprovechan al máximo las estadísticas de rendimiento disponibles en el sistema de gestión de la red real.

En esta tesis, se presenta una nueva formulación del problema de asignación de PCIs, que, además de considerar los problemas clásicos de colisión y confusión, también tiene en cuenta las colisiones de las señales de referencia tanto del canal ascendente como descendente de LTE.

Como punto de partida, se proponen en esta tesis sendos modelos de sistema para cuantificar el impacto de la asignación de PCIs en el enlace descendente y ascendente de LTE. Ambos modelos sirven para justificar la necesidad de la formulación propuesta. Como principal novedad, estos modelos formulan de forma analítica las condiciones en las que las señales de referencia de dos celdas vecinas colisionan entre sí, y sus efectos sobre la transmisión de datos. Ambos modelos se

han implementado en simuladores de nivel de sistema para evaluar el rendimiento de distintas estrategias de asignación de PCIs.

Como contribución adicional, los resultados que aquí se presentan han sido obtenidos sobre instancias del problema construidas a partir de datos de redes reales. En algunos casos, los datos de red se utilizan para configurar escenarios realistas sobre los que simular condiciones extremas, que sirven para poner de manifiesto las limitaciones de los métodos existentes y establecer una cota superior del beneficio obtenido por un método de planificación. En otros casos, los datos reales se utilizan para construir grafos de red ajustados a la realidad, con los que cuantificar de forma precisa la ganancia obtenida en la práctica.

En cuanto a la formulación propuesta, a diferencia de trabajos previos, en esta tesis se reformula por primera vez el problema de coloración de grafos tras la asignación de PCIs como un problema de partición de grafos, para el que existen códigos muy efectivos en el dominio público (p.ej., Metis [50], Jostle [51], Chaco [52]). Así, el problema de asignación de PCI se resuelve mediante un algoritmo de refinamiento de partición de grafos multinivel, que es el método de referencia respecto al que se compara el resto de métodos de partición de grafos [53] [54] [55].

El resto del capítulo se organiza de la siguiente manera. La sección 2.2 ofrece una breve descripción del problema de la planificación de PCI en una red LTE. Para ello, se revisa primero, de forma cualitativa, la influencia de la asignación de PCIs en el rendimiento de un sistema LTE. Posteriormente, en las secciones 2.3 y 2.4 se presentan sendos modelos analíticos para cuantificar el impacto de la asignación de PCI en el rendimiento del enlace descendente y ascendente de LTE, respectivamente. Una vez caracterizados los mecanismos que causan la degradación, la sección 2.5 plantea una formulación integrada de todos los problemas, para la que se adaptan distintos algoritmos clásicos de resolución basados en la teoría de grafos. La sección 2.6 presenta los resultados obtenidos con estos algoritmos sobre grafos construidos a partir de datos reales de la red. Finalmente, la sección 2.7 presenta las principales conclusiones de esta parte del trabajo.

## **2.2. Formulación del problema**

Esta sección introduce el problema de la asignación de PCIs en una red LTE. Para ello, se describe en primer lugar el mecanismo de obtención del PCI por

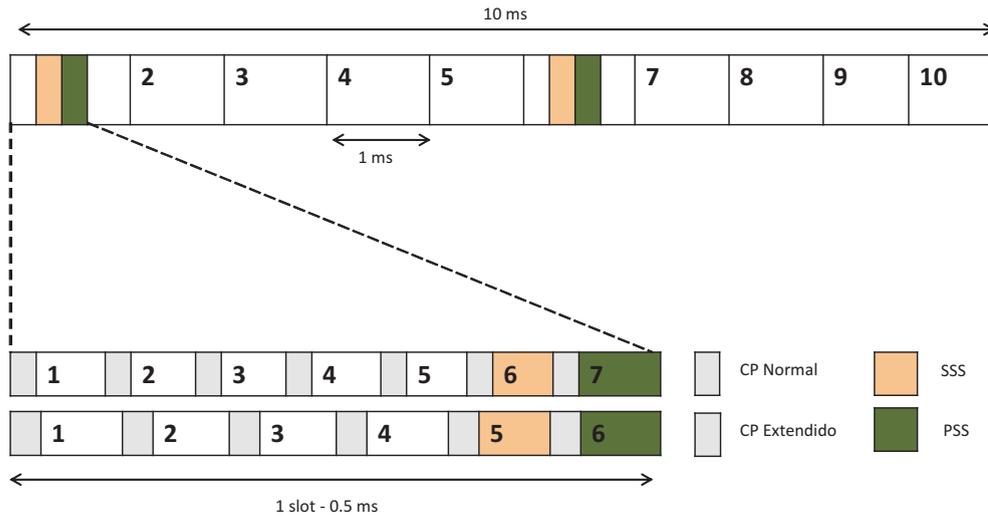
el terminal de usuario, a partir de las señales de sincronización emitidas por una celda. Seguidamente, se plantean las consideraciones a tener en cuenta para realizar una planificación de PCI adecuada. Con este fin, se describen, de forma cualitativa, los problemas de colisión y confusión asociados a la planificación, y la influencia del PCI en las señales de referencia tanto en el enlace ascendente como descendente. El objetivo de esta sección es que el lector entienda los eventos que degradan el sistema, y que dependen de la asignación de PCI, como son: a) la confusión-colisión de identificadores de celda, b) la colisión de las señales de referencia en el enlace descendente y c) la colisión de las señales de referencia en el enlace ascendente. En secciones posteriores, se desarrollan los modelos analíticos que permiten analizar de forma cuantitativa el impacto de la asignación de PCIs en el rendimiento de la red.

### 2.2.1. Señales de sincronización

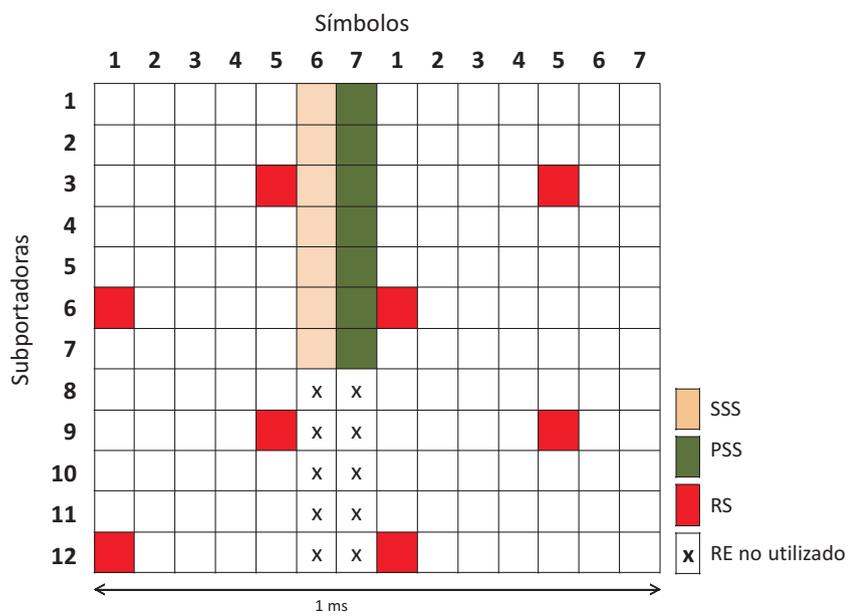
El primer paso para un usuario que se conecta a una red LTE es la búsqueda de celda. Este proceso consta de una serie de etapas mediante las que el usuario obtiene los parámetros necesarios para demodular correctamente la información del enlace descendente y transmitir las señales por el enlace ascendente con la temporización adecuada. La primera de estas etapas es la sincronización a nivel de trama temporal y con la de la estación base. Para ello, se utilizan dos señales de sincronización, la señal de sincronización primaria (*Primary Synchronization Signal*, PSS) y la señal de sincronización secundaria (*Secondary Synchronization Signal*, SSS).

La señal de sincronización primaria, PSS, se utiliza para detectar la frecuencia de portadora y la temporización de los símbolos del canal compartido (*Shared Channel*, SCH). Por su parte, la señal de sincronización secundaria, SSS, se utiliza para alinear la trama temporal, identificando los slots dentro de la trama.

En la Fig. 2.1 se representa la localización de las señales de sincronización dentro de la estructura temporal y frecuencial del enlace descendente. En la Fig. 2.1(a) se detalla la estructura temporal y en la Fig. 2.1(b) se especifica el mapeo de estas señales en el dominio de la frecuencia. Se aprecia en la figura cómo ambas señales se transmiten cada 5 ms. El PSS se encuentra en el último símbolo OFDM del primer slot temporal en la primera subtrama (subtrama 0). El SSS se encuentra en la misma subtrama que la señal PSS, pero en el símbolo anterior.



(a) Dominio del tiempo.



(b) Dominio de la frecuencia (caso CP normal)

FIGURA 2.1: Estructura de señales de sincronización.

La detección de estas señales no solo permite la sincronización en tiempo y frecuencia, sino que además permiten al usuario obtener el PCI de la celda. Específicamente, el usuario primero encuentra el PSS. Con el PSS, el usuario obtiene la identidad de capa física, que toma un valor en el rango 0-2. Posteriormente, el usuario encuentra la señal SSS, de la que obtiene el identificador de grupo de capa física, que toma un valor del rango 0-167.

Combinando la identidad de capa física obtenida de la señal PSS,  $N_{ID}^{(2)}$ , y el identificador de grupo de capa física obtenido de la señal SSS,  $N_{ID}^{(1)}$ , el valor del PCI de la celda en cuestión,  $i$ , se obtiene con la operación:

$$PCI(i) = 3 \cdot N_{ID}^{(1)}(i) + N_{ID}^{(2)}(i) . \quad (2.1)$$

De esta definición, se deduce que existen 504 valores posibles de PCI, que deben reutilizarse a lo largo de toda la red. De ahí surgen los problemas de colisión y confusión descritos en la siguiente subsección.

### 2.2.2. Problemas de colisión y confusión de PCI

El PCI sirve como identificador primario en el proceso de traspasos. Como consecuencia, una asignación de PCI a una celda (referida de aquí en adelante como plan de PCI) debe minimizar los conflictos locales causados por la reutilización de PCI. En la Fig. 2.2(a) se presenta el problema de colisión, que se produce cuando una celda posee una vecina con el mismo valor de PCI, en cuyo caso, si existe un usuario en el área de cobertura común de ambas celdas, éste no será capaz de decodificar los canales que ofrecidos por la estación base servidora. Por su parte, la Fig. 2.2(b) representa el problema de confusión, que ocurre cuando una celda tiene dos o más vecinas con el mismo valor de PCI. En este caso, la celda servidora será incapaz de identificar la celda objetivo cuando necesite realizar un traspaso.

De la figura, puede concluirse que una asignación adecuada de PCI es esencial para un correcto funcionamiento de la red. Esta asignación no es una tarea trivial, debido a que el número de celdas en la red es mucho mayor que el número de PCIs disponibles. En este sentido, debe precisarse que, aunque en teoría el número de valores distintos de PCI es 504, en la práctica no siempre se dispone del juego completo de valores (p.ej., porque el operador haya definido varios subconjuntos

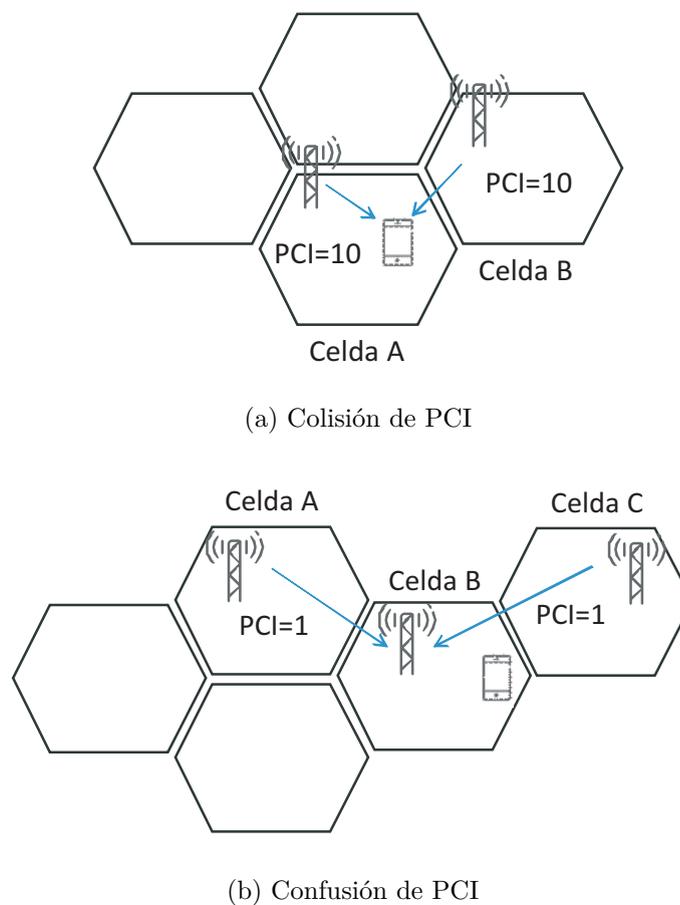


FIGURA 2.2: Problemas de colisión y confusión en la planificación de PCI.

de valores para desacoplar el problema de asignación de PCI entre las distintas capas de una red celular jerárquica). En este caso, el problema de asignación se complica cuando se intenta reducir el número de eventos de colisión y confusión. A esta dificultad, se añade la necesidad de considerar la influencia de la asignación de PCIs en las señales de referencia.

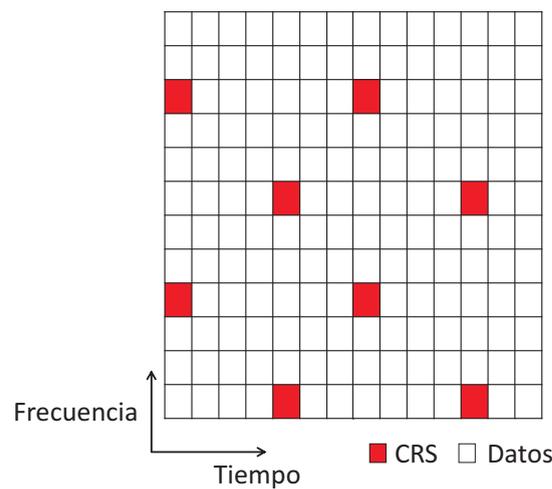
### 2.2.3. Influencia del PCI en las señales de referencia del enlace descendente

El valor del PCI determina la localización de las señales de referencia (*Cell Reference Signals*, CRS) dentro de la estructura de recursos físicos mostrada en la Fig. 2.1. En dicha estructura, además de la información de usuario, se incluyen una serie de señales de referencia (o símbolos piloto) que permiten, entre otras cosas, obtener medidas de calidad del enlace y estimas del estado del canal.

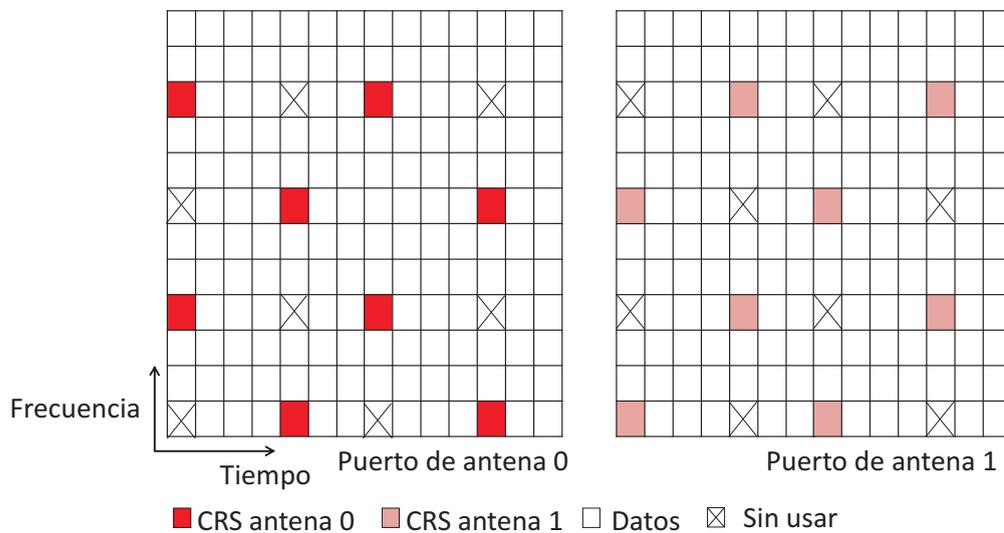
La Fig. 2.3(a) muestra el patrón de CRSs en tiempo y frecuencia para un bloque de recurso y un intervalo temporal (TTI) con un prefijo cíclico normal y 1 única antena transmisora. Los cuadrados de la figura representan los elementos de recurso (RE), consistentes en la combinación de 1 subportadora y 1 símbolo OFDM. Los cuadrados coloreados corresponden a REs reservados para CRSs, mientras que los cuadrados vacíos se corresponden con REs reservados para la transmisión de datos en el canal físico compartido del enlace descendente (*Physical Downlink Shared Channel*, PDSCH), el canal físico de control del enlace descendente (*Physical Downlink Control Channel*, PDCCH), el canal de radiodifusión (*Physical Broadcast Channel*, PBCH) o el canal de difusión múltiple (*Physical Multicast Channel*, PMCH)[24].

Es importante recalcar que las CRSs se transmiten siempre en el mismo símbolo OFDM en todos los PRBs de la celda, sin importar su valor de PCI. Sin embargo, en el dominio de la frecuencia, el valor del PCI en la celda define el desplazamiento en frecuencia de las CRSs entre un conjunto limitado de valores, determinados por la operación módulo-6 o módulo-3 del PCI según la configuración de la antena. Concretamente, en el caso de utilizar técnicas SISO (*Single Input Single Output*) o SIMO (*Single Input Multiple Outputs*), es decir, cuando se utiliza una única antena transmisora, el desplazamiento en frecuencia de las CRSs viene determinado por el módulo-6 del PCI. En el caso de utilizar técnicas MISO (*Multiple Inputs Single Outputs*) 2x1 o MIMO (*Multiple Inputs Multiple Outputs*) 2x2, es decir, cuando se utilizan dos antenas transmisoras [29], el desplazamiento en frecuencia de las CRSs viene determinado por el módulo-3 del PCI, como se observa en la Fig. 2.3(b). En esta figura, los cuadrados representados con aspas son recursos que no se utilizan para la transmisión, ya que coinciden en tiempo y frecuencia con aquellos recursos en los que la otra antena está enviando las señales pilotos.

En el caso de utilizar 4 puertos de antena (MISO 4x1, MIMO 4x4, MIMO 4x2), las señales de referencia de las dos antenas añadidas se envían en el siguiente slot temporal (no en el mismo símbolo OFDM). El desplazamiento en frecuencia es el mismo que en el caso de 2 puertos de antena. Por lo tanto, la localización de las señales CRS viene dada igualmente por la operación PCI módulo 3. La operación módulo - 6 (ó módulo - 3) hace que las CRSs estén decaladas en 6 (ó 3) subportadoras en la rejilla de recursos, según se tenga 1 (ó 2) antenas transmisoras, como se aprecia en la Fig. 2.3. Así, se puede concluir que cada celda tiene un patrón específico de localización de las señales de referencia que depende de su PCI.



(a) 1 antena transmisora



(b) 2 antenas transmisoras

FIGURA 2.3: Patrón de señales de referencia en el enlace descendente.

En esta tesis, se considera una configuración de dos antenas transmisoras MIMO 2x2, al ser la que actualmente implementan la mayoría de las redes LTE desplegadas. En ese caso, la posición de las señales de referencia dentro del bloque de recursos viene dada por la operación  $PCI \bmod 3$ , que coincide, por definición, con el valor del PSS, como puede deducirse de la ecuación (2.1). A partir de esta observación, en el resto del documento, en el enlace descendente, se habla indistintamente de asignación de PCI o PSS, ya que lo que se analiza es el impacto de la posición de las señales de referencia, y ésta depende únicamente del valor de PSS.

## Influencia del PCI en la estimación de las condiciones de canal

Como se comentó en el Capítulo 1, una de las funcionalidades importantes de la capa de enlace en LTE es la función de adaptación dinámica del enlace (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC). Esta función tiene como objetivo seleccionar el esquema de modulación y codificación más adecuado para cada usuario en cada momento de la transmisión. Para llevar a cabo correctamente esta función, es necesario estimar el canal radio que percibe cada usuario. A partir de dicha estimación, la función AMC selecciona un MCS para cada usuario. Los posibles esquemas de modulación que se utilizan son QPSK, 16-QAM y 64-QAM. En función del MCS seleccionado para un usuario, éste percibirá una tasa binaria u otra.

El objetivo perseguido por la función AMC es asignar las mayores tasas binarias de transmisión a los usuarios que estén experimentando mejores condiciones de canal. A aquellos usuarios que estén experimentando baja calidad en el enlace se les asignan esquemas de modulación más robustos, aunque esto suponga unas tasas de transmisión más bajas. Para determinar el MCS concreto que se debe asignar a un usuario, se busca aquél que garantice una calidad mínima de la comunicación, expresada, por ejemplo, como tasa de error de bit (*Block Error Rate*, BLER) mínima requerida, para las condiciones de canal estimadas.

En LTE, las estimas de las condiciones del canal se basan en medidas de la calidad de señal (en términos de SINR) realizadas sobre las señales de referencia. Dicha calidad se degrada cuando las CRSs de celdas vecinas colisionan, lo que viene determinado por el plan de PCI implementado en la red. Estas medidas de SINR se utilizan para calcular los indicadores de calidad del canal descendente (*Channel Quality Indicator*, CQI) reportados por el usuario, a partir de los que la estación base selecciona un MCS adecuado para el PDSCH. Por ello, el plan de PCI influye en el rendimiento de la red a través de los problemas de confusión-colisión y a través de las colisiones de señales de referencia. Estas colisiones tienen un impacto en las estimas de las condiciones del canal y, con ello, en la eficiencia espectral del enlace descendente.

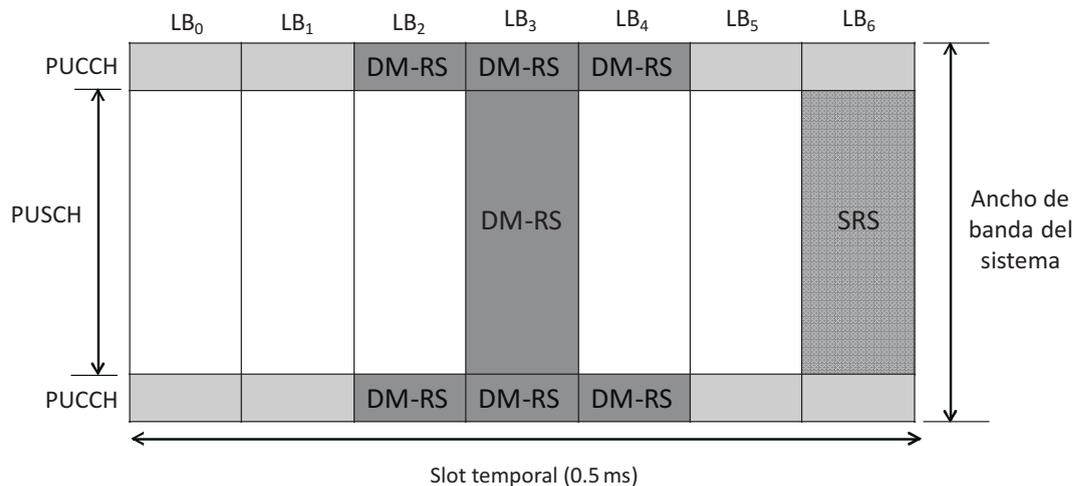


FIGURA 2.4: Estructura de recursos radio del enlace ascendente.

#### 2.2.4. Influencia del PCI en las señales de referencia en el enlace ascendente

En LTE se definen dos tipos de señales de referencia para el enlace ascendente [2]:

- Señales de referencia para demodulación (DM RS), usadas para estimación de canal y demodulación coherente tanto en el canal de datos (PUSCH) como en el canal de control (PUCCH), y
- Señales de referencia para sondeo (*Sounding Reference Signals*, SRS), no asociadas con ningún canal de datos o de control específico, y usadas para estimar la calidad del canal durante la asignación dinámica de recursos selectiva en frecuencia en el enlace ascendente.

En la Fig. 2.4 se observa cómo se integran estas señales en la estructura de recursos radio del enlace ascendente. El canal PUCCH utiliza recursos reservados en los extremos de la banda. En la figura, DM RS y SRS representan la ubicación de las señales de referencia y LB es un bloque largo (*Long Block*). Las señales DM RS siempre se envían en símbolos fijos de la subtrama, que en el caso del canal PUCCH dependen del formato de la misma. En cambio, las señales de referencia SRS se transmiten en el último símbolo de la subtrama, utilizando todo el ancho de banda del sistema.

Todas las señales de referencia del canal ascendente se basan en secuencias de Zadoff-Chu (ZC) o en secuencias de alfabeto QPSK, diseñadas para asegurar baja

correlación cruzada entre secuencias [56]. Las secuencias de las señales de referencia  $r_{u,v}^{(\alpha)}(n)$  se definen a partir de una secuencia base,  $\bar{r}_{u,v}(n)$ , y un desplazamiento cíclico,  $\alpha$ . Las secuencias base están divididas en grupos, donde  $u$  es el número de grupo y se define en un rango  $u \in 0, 1, \dots, 29$ , y  $v$  es el número de la secuencia base dentro del grupo. Se define, por lo tanto, la secuencia base de la siguiente forma

$$r_{u,v}^{(\alpha)}(n) = e^{j\alpha n} \bar{r}_{u,v}(n), 0 \leq n \leq M_{sc}^{RS} \quad (2.2)$$

donde  $M_{sc}^{RS}$  es el número de subportadoras asignadas. La restricción mostrada en la ecuación,  $0 \leq n \leq M_{sc}^{RS}$ , se debe a que las señales de referencia deben ocupar completamente el ancho de banda asignado al usuario para la transmisión de datos. Esto fuerza a que el tamaño de las secuencias, medido en símbolos,  $N_m$ , sea igual al número de subportadoras asignadas,  $M_{sc}^{RS}$ , que es 12 veces el número de RBs asignados a la transmisión en el enlace ascendente,  $m$ , de forma que

$$N_m = M_{sc}^{RS} = m \cdot 12, \quad 1 \leq m \leq N_{RB}^{UL}, \quad (2.3)$$

donde  $N_{RB}^{UL}$  es el ancho de banda total del enlace ascendente en PRBs [57].

El valor del PCI define el conjunto de señales de demodulación (DM RS) transmitidas por el usuario, y posteriormente usadas por la estación base para estimar el canal y realizar una demodulación coherente en el canal de datos PUSCH y en el canal de control PUCCH [24]. Si dos usuarios de celdas diferentes usan el mismo código de demodulación, el proceso de decodificación en el PUCCH o PUSCH se degrada, lo que puede causar que la estación base no pueda identificar correctamente al usuario. Como se describe en [3], la definición de las señales DM RS del canal de datos de usuario PUSCH puede desacoplarse de la planificación de PCI por medio de parámetros de configuración, y, por tanto, el diseño de estas señales puede optimizarse de manera independiente. Sin embargo, éste no es el caso en el canal de control PUCCH, donde la definición del PCI determina las señales de referencia.

La Fig. 2.5 muestra la estructura de recursos en tiempo y frecuencia disponibles para el canal de control PUCCH. A cada usuario se le asigna una región PUCCH, consistente en un PRB y una subtrama (1 ms). Cada región PUCCH alterna su primer slot en un extremo del ancho de banda y el segundo en el extremo opuesto (arriba y abajo en la figura). Con ello, se introduce diversidad de frecuencia incluso en sistemas con ancho de banda reducido, incrementando la robustez de los

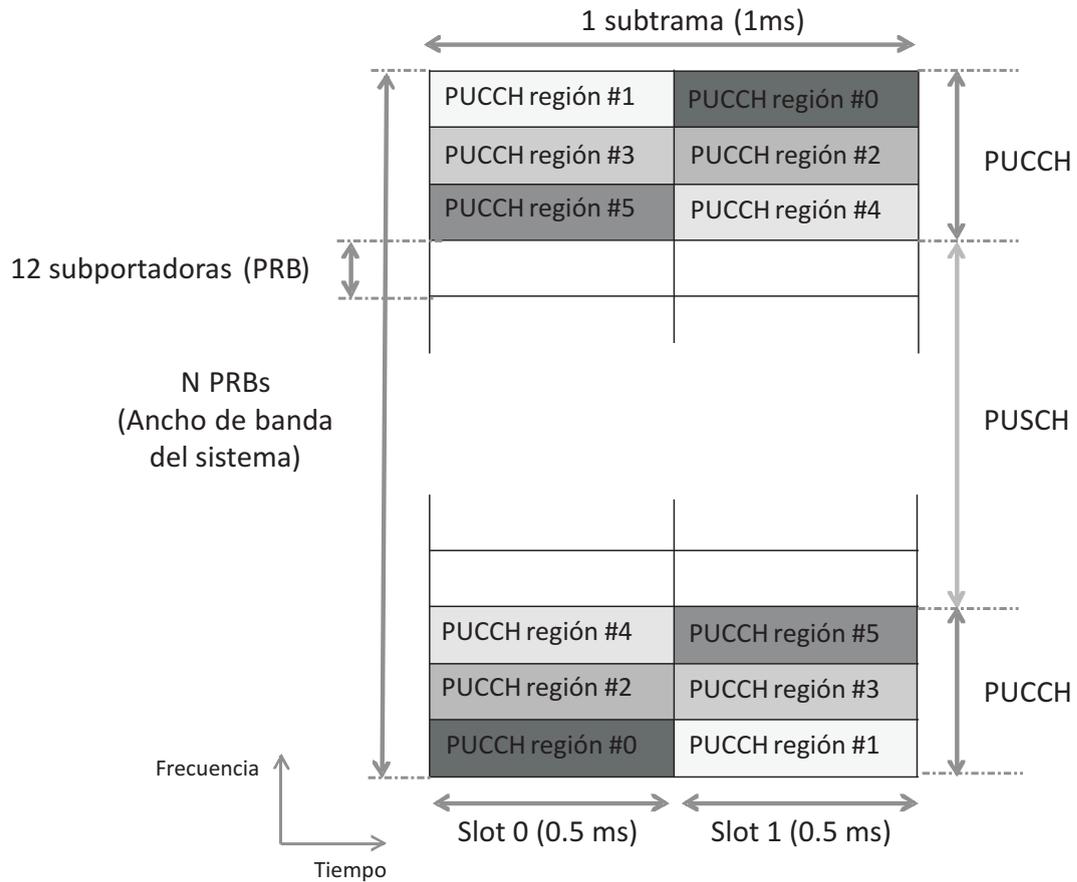


FIGURA 2.5: Estructura del canal PUCCH.

mensajes de control enviados por el PUCCH. El número exacto de PRBs reservados para el PUCCH es un parámetro de celda que se fija durante la planificación de la red, dependiendo de su ancho de banda [24]. En las redes reales analizadas en este trabajo, el número de PRBs asignados al PUCCH oscila entre 4 y 8.

En el PUCCH, varios usuarios pueden transmitir de forma simultánea mediante la asignación de diferentes regiones/PRBs, basándose en la multiplexación por división de frecuencia (FDM). Además, varios usuarios pueden compartir la misma región PUCCH mediante multiplexación por división de código (CDM), como se detalla más adelante. Así se especificará bajo qué condiciones dos usuarios colisionan debido a sus señales de referencia DM RS, y cómo estas condiciones dependen del plan de PCI.

## 2.3. Modelo de sistema del enlace descendente

Esta sección desarrolla la formulación para evaluar, de forma cuantitativa, la influencia de la asignación de PCI sobre la transmisión de datos de usuario en el enlace descendente de LTE. Para ello, se presenta un nuevo modelo de interferencia para las señales de referencia del enlace descendente. Este modelo está concebido para integrarse en un simulador de nivel de sistema, con el que evaluar el rendimiento del canal compartido de datos del enlace descendente (PDSCH) en función del plan de PCI. Con dicho simulador, se realizan diversos experimentos para cuantificar el impacto de la asignación de PCI en el rendimiento del enlace descendente de LTE.

### 2.3.1. Esquemas de planificación de PSS

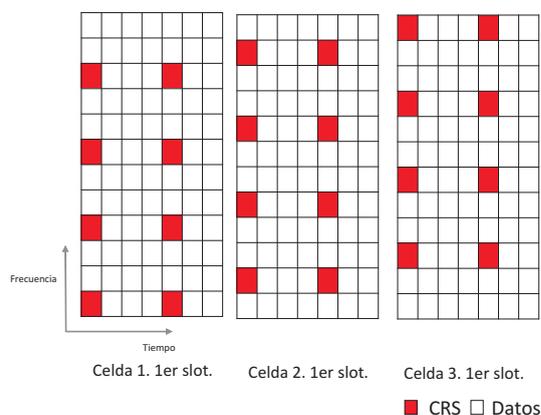
La asignación de PSS<sup>1</sup> determina el alineamiento de los pilotos de señalización (CRSs) o de los elementos de recursos de datos (subportadoras de los canales PDSCH/PDCCH) entre celdas vecinas. Cuando se asigna un valor de PSS a cada celda, se puede optar por favorecer las colisiones entre señales de referencia (CRS  $\rightarrow$  CRS) o favorecer la interferencia de las señales de referencia sobre los canales de datos (CRS  $\rightarrow$  datos de PDSCH/PDCCH). Estas dos opciones son las estrategias que se describen a continuación.

#### a) Señales de referencia decaladas en frecuencia

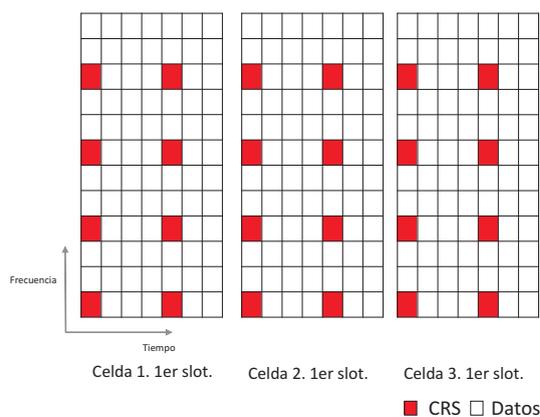
Este esquema utiliza diferentes valores de PSS en celdas adyacentes, asegurando así que los pilotos están ubicados en subportadoras donde las celdas adyacentes transmiten datos. La Fig. 2.6(a) muestra la posición de las señales de referencia en tres celdas vecinas usando una estrategia decalada. El eje horizontal representa el tiempo (símbolos OFDM) y el eje vertical representa la frecuencia (subportadoras). De la figura, puede deducirse que el número de PSSs diferentes está limitado a 3 ( $PCI \bmod 3$ ). Con esta limitación, resulta obvio que, en caso de existir 3 o más celdas colindantes, es imposible eliminar por completo las colisiones. Aun así, una planificación de PSS adecuada puede evitar las colisiones entre las celdas vecinas más conflictivas (p.ej., aquéllas entre las que el grado de solapamiento sea mayor).

---

<sup>1</sup>Recuérdese que, para la configuración MIMO 2x2 asumida, la posición de las CRS del enlace descendente viene fijada unívocamente por la PSS.



(a) Decalado en frecuencia



(b) Alineamiento en frecuencia

FIGURA 2.6: Patrón de CRS en celdas vecinas con distintos planes de PSS.

### b) Señales de referencia alineadas en frecuencia

Este esquema utiliza el mismo valor de PSS entre celdas adyacentes, ubicando las señales de referencia en las mismas subportadoras en todos los PRBs. El plan de PSS correspondiente se muestra en la Fig. 2.6(b), donde se observa que existen colisiones de pilotos en todas las celdas.

### 2.3.2. Modelo de rendimiento del PDSCH

En este apartado se describe un modelo novedoso para cuantificar el impacto de la planificación de PCI en el canal de datos compartido del enlace descendente de LTE (PDSCH). La principal contribución del modelo propuesto es la estima del nivel de interferencia considerando el entorno de propagación, la distribución

de carga espacio-temporal y el plan de PSS configurado en la red. El modelo se completa con el proceso de adaptación del enlace.

### 2.3.2.1. Modelo de interferencia

Para describir los niveles de interferencia recibida en el enlace descendente, se definen tres matrices:

- a) una matriz de interferencia,  $I_{DL}(i, j, k)$ , que caracteriza el nivel de potencia media recibida por RE por el usuario  $i$  de cada estación base  $j$  en cada PRB  $k$ , suponiendo que éste último está ocupado (es decir, la matriz de interferencia caracteriza el nivel de señal potencial cuando existe colisión en la interfaz radio). La Fig. 2.7(a) muestra la estructura de esta matriz, cuyos valores dependen del nivel de potencia transmitido, de las pérdidas de propagación asociadas al usuario (incluyendo la ganancia de las antenas) y del desvanecimiento selectivo en frecuencia (responsable de las diferencias que aparecen entre los PRBs). Se asume aquí que la potencia transmitida es la misma para los REs utilizados para datos y los utilizados para pilotos (es decir, no se utiliza *power boosting* en los pilotos [24]).
- b) dos matrices de probabilidad de colisión,  $CP_{pilotos}(i, j, k)$  y  $CP_{datos}(i, j, k)$ , que reflejan la probabilidad de colisión en el enlace descendente en el PRB  $k$  de la celda servidora del usuario  $i$  con un usuario de la celda interferente  $j$  (que debe estar asignado al mismo PRB  $k$ ). En particular, la primera matriz refleja la probabilidad de colisión CRS  $\rightarrow$  CRS y la probabilidad de colisión PDSCH/PDCCH  $\rightarrow$  CRS, mientras que la segunda matriz refleja las colisiones CRS  $\rightarrow$  PDSCH/PDCCH y de PDSCH/PDCCH  $\rightarrow$  PDSCH/PDCCH. Como se discute más adelante, estas matrices no dependen únicamente del PCI de la celda interferente  $j$ , sino que también dependen del valor de PCI de la celda servidora del usuario  $i$ . Por ello, se necesita una estructura tridimensional, como la mostrada en la Fig. 2.7(b).

A partir de estas matrices, el nivel de interferencia medio recibido en los REs ocupados por las señales de referencia (CRS) o por datos (PDSCH/PDCCH) se calcula según:

$$I_{pilotos}(i, j, k) = I_{DL}(i, j, k) CP_{pilotos}(i, j, k), \quad (2.4)$$

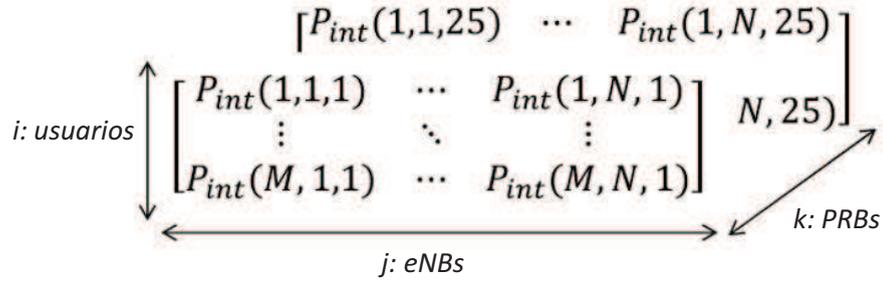
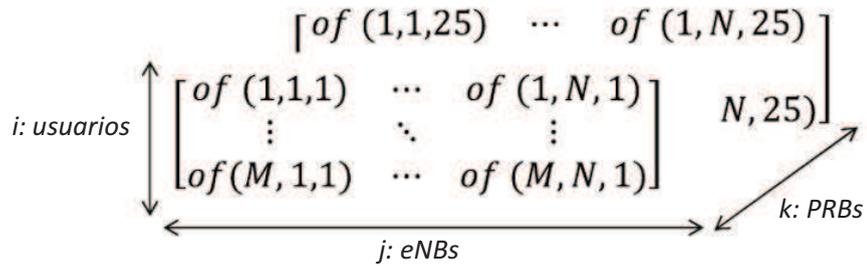

 (a) Matriz de interferencia,  $I_{DL}(i, j, k)$ 

 (b) Matriz de probabilidad de colisión,  $CP(i, j, k)$ 

 FIGURA 2.7: Estructura de variables utilizadas en el modelo de interferencia (caso  $M$  usuarios,  $N$  celdas, 25 PRBs).

$$I_{datos}(i, j, k) = I_{DL}(i, j, k) CP_{datos}(i, j, k). \quad (2.5)$$

En la práctica, los valores de las matrices de interferencia,  $I_{pilotos}$  y  $I_{datos}$ , fluctúan porque: a)  $I_{DL}$  cambia cuando se desplaza el usuario, como resultado del cambio de las pérdidas de propagación con las celdas potencialmente interferentes, y b)  $CP_{pilotos}$  y  $CP_{datos}$  cambian, por los cambios en la ocupación de PRBs en la celda interferente, debidos tanto al inicio/fin de llamadas como al proceso de adaptación del enlace. Esta última dependencia con la carga de la red se formula como:

$$\begin{aligned} CP_{pilotos}(i, j, k) &= CP_{pilotos \rightarrow pilotos}(i, j, k) + CP_{datos \rightarrow pilotos}(i, j, k) \\ &= P_{crs \text{ alineado}}(i, j) + (1 - P_{crs \text{ alineado}}(i, j)) L(j, k), \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
 CP_{\text{datos}}(i, j, k) &= CP_{\text{pilotos} \rightarrow \text{datos}}(i, j, k) + CP_{\text{datos} \rightarrow \text{datos}}(i, j, k) \\
 &= \frac{N_{re\ crs}(1 - P_{crs\ alineado}(i, j))}{N_{re\ datos}} \\
 &\quad + \frac{N_{re\ datos} - N_{re\ crs}(1 - P_{crs\ alineado}(i, j))}{N_{re\ datos}} L(j, k),
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

donde  $P_{crs\ alineado}(i, j)$  es la probabilidad de que las señales de referencia CRSs estén alineadas en tiempo y frecuencia en las celdas servidora e interferentes (es decir, probabilidad de que se produzcan colisiones de CRS),  $L(j, k)$  es la carga media del PRB  $k$  en la celda interferente  $j$ , y  $N_{re\ datos}$  y  $N_{re\ crs}$  son el número de REs utilizados por PRB y slot temporal, para datos o señales de referencia, respectivamente.

En la ecuación (2.6), se usa que la probabilidad de colisión es 1 cuando se colisiona con una señal piloto y  $L(j, k)$  cuando se colisiona con un RE utilizado para datos.

Para obtener (2.7), se utiliza también que el número de colisiones CRS  $\rightarrow$  PDSCH/PDCCH por PRB y slot temporal puede ser como mucho  $N_{re\ crs}$ . Conviene recalcar que  $P_{crs\ alineado}(i, j)$  en (2.6) y (2.7) puede tomar valores fraccionarios, en cuyo caso reflejará el ratio de CRSs que colisionan con otras CRSs.

De la Fig. 2.6, puede deducirse que  $N_{re\ crs} = 8$ , y  $N_{re\ datos} = 12 \cdot 8 - N_{re\ crs} = 76$ , para el caso de 2 antenas transmisoras. Con estos valores, las ecuaciones (2.6) y (2.7) se traducen en

$$CP_{\text{pilotos}}(i, j, k) = P_{crs\ alineado}(i, j) + (1 - P_{crs\ alineado}(i, j)) L(j, k), \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}
 CP_{\text{datos}}(i, j, k) &= \frac{8(1 - P_{crs\ alineado}(i, j))}{76} \\
 &\quad + \frac{76 - 8(1 - P_{crs\ alineado}(i, j))}{76} L(j, k),
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Para simplificar la formulación, se identifican dos situaciones diferentes dependiendo de si la red está o no sincronizada (es decir, si la trama temporal de una celda está alineada o no con las vecinas). A continuación se presentan las fórmulas para estos dos casos de interés. Posteriormente, con el modelo particularizado para estos dos casos, se presenta un análisis teórico preliminar donde se adelantan algunos resultados.

a) Red sincronizada temporalmente

En una red con sincronización temporal, la estructura de trama de todas las estaciones base está alineada en tiempo, y, por lo tanto, las CRSs de todas las celdas se transmiten en el mismo símbolo OFDM. Así,  $P_{alineado\ crs}(i, j)$  es 1 si la celda servidora e interferente tienen el mismo valor de PSS, y 0 en el caso contrario. Sustituyendo estos valores en la ecuación (2.6), se obtiene que:

$$CP_{pilotos}(i, j, k) = \begin{cases} 1 & \text{si } PSS(S(i)) = PSS(j), \\ L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) \neq PSS(j), \end{cases} \quad (2.10)$$

y

$$CP_{datos}(i, j, k) = \begin{cases} L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) = PSS(j), \\ \frac{N_{re\ crs}}{N_{re\ datos}} + \frac{N_{re\ datos} - N_{re\ crs}}{N_{re\ datos}} L(j, k) & \\ L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) \neq PSS(j), \end{cases} \quad (2.11)$$

donde  $PSS(j)$  es el valor de PSS de la celda  $j$  y  $S(i)$  es la celda servidora del usuario  $i$ .

#### b) Red no sincronizada temporalmente

Cuando no hay sincronización temporal entre celdas, la estructura de trama de una pareja de estaciones base puede estar desalineada. La Fig. 2.8 muestra el ratio de CRSs que colisionan entre dos estaciones base con 2 antenas transmisoras para diferentes desplazamientos, suponiendo que las CRSs están en la misma subportadora en las dos celdas. A partir de los valores de la figura, se deduce que, para la configuración MIMO 2x2 considerada, el ratio medio de CRSs colisionando en tiempo es  $\frac{1+0.5+0.5}{7} = \frac{2}{7}$ . Así,  $P_{crs\ alineado}(i, j)$  es  $2/7$  si la celda servidora y la interferente tienen el mismo valor de PSS, y 0 en otro caso. Por lo tanto, sustituyendo en (2.6) y (2.7),

$$CP_{pilotos}(i, j, k) = \begin{cases} \frac{2}{N_s} + (1 - \frac{2}{N_s})L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) = PSS(j), \\ L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) \neq PSS(j), \end{cases} \quad (2.12)$$

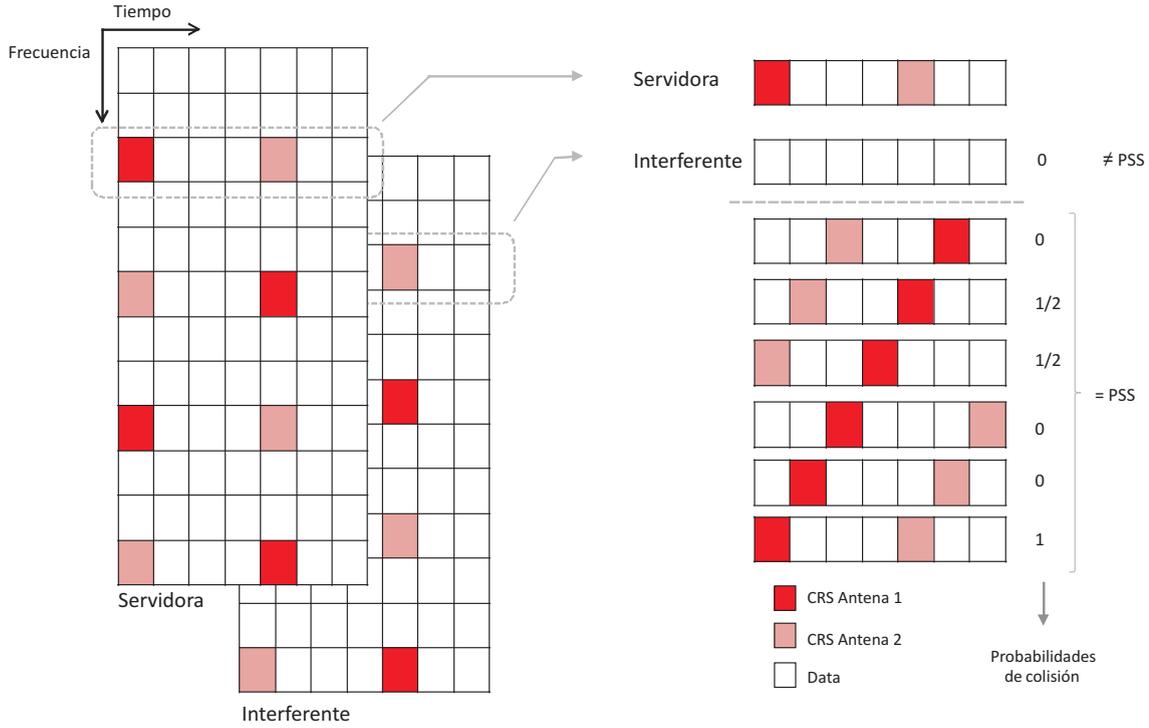


FIGURA 2.8: Posibles desplazamientos temporales y su probabilidad de colisión.

$$CP_{datos}(i, j, k) = \begin{cases} \frac{N_{re\ crs}(1 - \frac{2}{N_s})}{N_{re\ datos}} + \left( \frac{N_{re\ datos} - N_{re\ crs}(1 - \frac{2}{N_s})}{N_{re\ datos}} \right) L(j, k), & \text{si } PSS(S(i)) = PSS(j) , \\ \frac{N_{re\ crs}}{N_{re\ datos}} + \left( \frac{N_{re\ datos} - N_{re\ crs}}{N_{re\ datos}} \right) L(j, k) & \text{si } PSS(S(i)) \neq PSS(j) , \end{cases} \quad (2.13)$$

donde  $N$  es el periodo de transmisión de pilotos expresado en símbolos OFDM (de forma que un piloto se envía cada  $N$  símbolos OFDM en una subportadora de CRS). Las probabilidades de colisión para otra configuración de antena pueden obtenerse fácilmente siguiendo la metodología descrita en la Fig. 2.8.

### 2.3.2.2. Análisis teórico preliminar

Analizando las fórmulas anteriores, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. En (2.7), se observa que  $CP_{datos}(i, j, k) \approx L_{datos}(j, k)$  independientemente del valor de  $P_{alineado\ crs}$ , ya que  $N_{re\ crs}/N_{re\ datos} \rightarrow 0$ .

2. Comparando (2.10) con (2.11) y (2.12) con (2.13), se observa que, con y sin sincronización de red,  $CP_{pilotos} \neq CP_{datos}$ , lo que conlleva que  $I_{pilotos} \neq I_{datos}$ . Estas diferencias en los niveles de interferencia recibidos en los REs dedicados a pilotos y datos causa que la calidad del canal (en términos de SINR) se subestime o se sobreestime. Más específicamente, si  $CP_{pilotos} > CP_{datos}$ , entonces  $I_{pilotos} > I_{datos}$ ,  $SINR_{pilotos} < SINR_{datos}$ , con lo que la calidad del canal se subestima. Como consecuencia, se selecciona un MCS excesivamente conservador, que no aprovecha al máximo las posibilidades del canal. Por el contrario, si  $CP_{pilotos} < CP_{datos}$ , entonces  $I_{pilotos} < I_{datos}$ ,  $SINR_{pilotos} > SINR_{datos}$ , con lo que la calidad del canal se sobreestima, lo cual podría conllevar muchas retransmisiones. Ambas situaciones tienen como consecuencia una degradación del rendimiento del enlace descendente y, por lo tanto, deben evitarse.
3. Una comparación similar muestra que la magnitud del error de estimación es mayor cuando las condiciones del canal se subestiman que cuando se sobreestiman. Por ejemplo, en el caso de red no sincronizada temporalmente,  $CP_{pilotos} - CP_{datos} = 1 - L_{datos} \geq 0$  si las celdas tienen valores distintos de PSS (caso de subestimación), mientras que  $CP_{pilotos} - CP_{datos} \approx L_{datos} - L_{datos} = 0$  si las celdas comparten el valor de PSS (caso de sobreestimación).
4. Como se espera,  $CP_{datos} \rightarrow CP_{pilotos}$  cuando  $L_{datos} \rightarrow 1$ , ya que los niveles de interferencia son similares en los REs utilizados para datos y en los REs utilizados para pilotos en una red totalmente cargada.

A partir de estas observaciones, se deduce que un plan de PCI apropiado, en el que se reducen las colisiones entre CRS, aumenta la eficiencia espectral del sistema al mejorar las estimas de las condiciones de canal, especialmente en escenarios poco cargados. En la subsección 2.3.3 se comprueba la validez de estas afirmaciones mediante simulaciones.

### 2.3.2.3. Modelo de adaptación del enlace en el PDSCH

A partir del valor de interferencia  $I_{pilotos}$  obtenido en (2.4), se obtiene la relación  $SINR_{pilotos}$ , que será el valor que se utilice para seleccionar un MCS adecuado a las condiciones del canal.

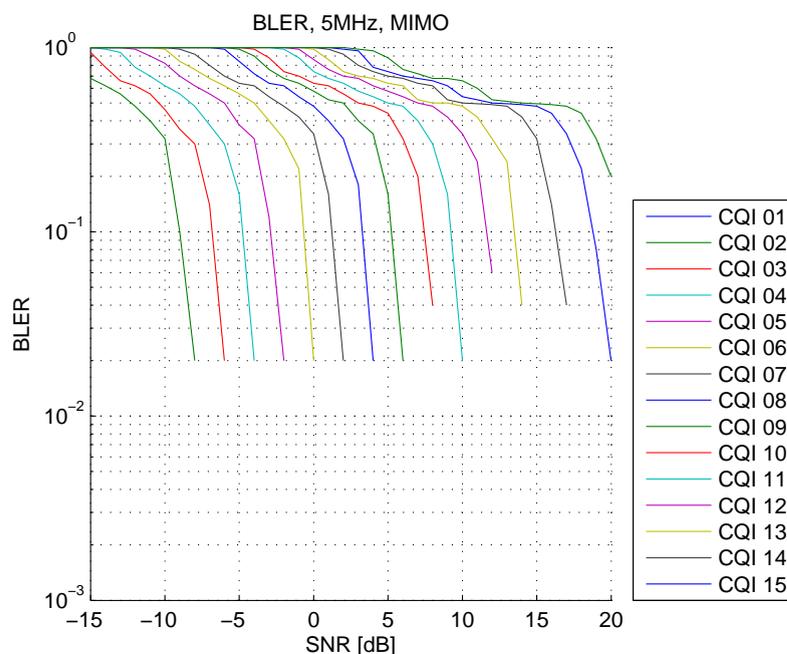


FIGURA 2.9: BLER según SINR para los diferentes esquemas de modulación y codificación.

La Fig. 2.9 muestra las curvas de adaptación del enlace utilizadas en este trabajo, que se corresponden con las de una configuración MIMO 2x2 y un ancho de banda del sistema de 5 MHz. Los esquemas de modulación representados son, de izquierda a derecha, QPSK 1/3, QPSK 1/2, QPSK 2/3, QPSK 3/4, QPSK 4/5, QPSK, 16QAM 1/3, 16QAM 1/2, 16QAM 2/3, 16QAM 3/4, 16QAM 4/5, 16QAM. Estas curvas han sido obtenidas a partir de un simulador de nivel de enlace [58]. A partir de dichas curvas, es posible obtener el MCS requerido para el nivel de SNR estimado que garantice una BLER menor que 0.1 (valor típico en LTE).

Una vez fijado el esquema de modulación seleccionado, el valor de  $SINR_{pilotos}$  puede mapearse en un valor de eficiencia espectral (bit/s/Hz), tal como se muestra en la Fig. 2.10. Estas curvas dependen de diversos parámetros, como el tipo de canal, las condiciones de movilidad o la configuración de antena. Concretamente, en la figura se muestra el resultado simulado para un canal ETU (*Extended Typical Urban model*), con una velocidad de usuario de 3 km/h y una configuración MIMO 2x2 [1].

Así pues, la salida del modelo propuesto es el valor de eficiencia espectral resultante en el canal PDSCH.

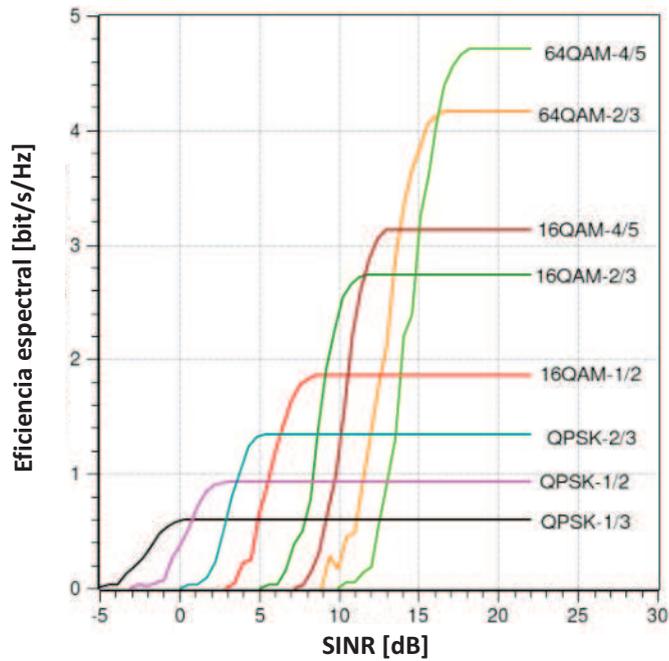


FIGURA 2.10: Eficiencia espectral según SINR [1].

### 2.3.3. Análisis de rendimiento

A continuación se compara el rendimiento de los esquemas de asignación de PSS descritos mediante simulaciones. Para ello, se implementa el modelo de interferencia anteriormente propuesto en un simulador dinámico de nivel de sistema. La descripción completa del simulador utilizado se incluye en el apéndice A. Por claridad, se describe en primer lugar la metodología experimental seguida en el análisis y posteriormente se presentan los resultados.

#### 2.3.3.1. Metodología experimental

El escenario considerado en las simulaciones, que se muestra en la Fig. 2.11, consiste en un escenario macrocelular de 19 emplazamientos tri-sectoriales uniformemente distribuidos [59]. Para evitar efectos de borde, se utiliza la técnica de envoltura (*wrap-around*), con réplicas del escenario original alrededor de éste.

La Tabla 2.1 muestra los principales parámetros de la herramienta de simulación utilizada. Para un conocimiento más amplio de estos parámetros, puede consultarse el apéndice A.

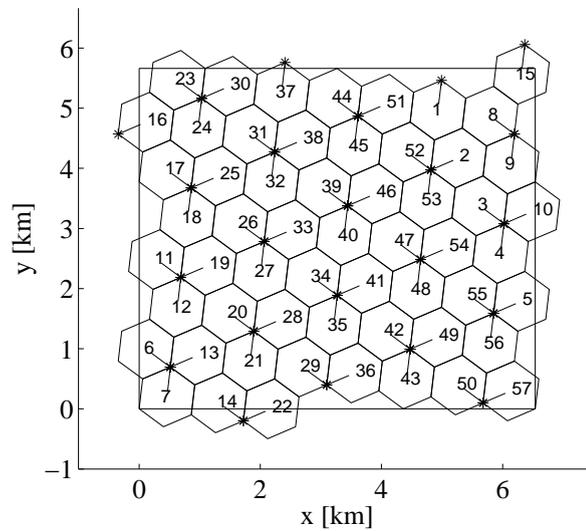


FIGURA 2.11: Escenario de simulación.

TABLA 2.1: Parámetros de simulación.

Geometría celular	Rejilla hexagonal
Dirección de transmisión	57 celdas (3 emplazamientos * 19 sectores)
Frecuencia de portadora	Enlace descendente
Ancho de banda del sistema	2.0 GHz
Reutilización de frecuencia	5 MHz (25 PRBs)
Radio de celda	1
Distancia entre emplazamientos (ISD)	0.5 km
Modelo de propagación	1.5 km
	Okumura-Hata con técnica de envoltura
	Desvanecimiento lento log-normal, $\sigma = 8$ dB,
	Distancia de correlación=20 m
	Desvanecimiento multicamino, modelo ETU
Modelo de movilidad	Dirección aleatoria, velocidad constante, 3 km/h
Modelo de servicio	VoIP: proceso de llegadas de Poisson,
	duración llamada exponencial
	duración media de llamada: 120 s, 16 kbps
	<i>Full Buffer</i> : demanda de tráfico infinita por usuario
Modelo de estación base	Antena trisectorial, MIMO 2x2, $PIRE_{max} = 43$ dBm
Planificador de recursos	<i>Proportional Fair</i>
	Resolución: 1PRB
Distribución de carga	Distribución espacial uniforme y no uniforme
Modelo de llamadas caídas	Temporizador de <i>timeout</i> = 1 sec
Resolución temporal	100 TTI (100 ms)
Tiempo de red simulado	1 hora (por cada plan PCI)

En el análisis, se consideran dos tipos de servicios: *Full Buffer* (FB) y *Voice-over-IP* (VoIP). La selección de un servicio FB pretende evaluar el impacto de la planificación de PSS en servicios de retardo tolerable, que pueden aprovechar al máximo la capacidad de la red utilizando transmisión a ráfagas, mientras que en el caso de servicio VoIP se evalúa el impacto de la planificación de PSS en servicios de baja tasa de datos pero muy sensibles al retardo de paquete. Por definición, un usuario FB hará siempre uso de todos los recursos radio libres en la red en cada momento. Por el contrario, un usuario VoIP transmite paquetes con un tamaño fijo y una frecuencia fija (40 bytes cada 20 msg, para una tasa de transmisión de 16 kbps). Ambos servicios se simulan independientemente (es decir, en experimentos separados), para estudiar el impacto del plan de PSS sobre el servicio y no el comportamiento del planificador dinámico de paquetes (*scheduler*).

Igualmente, se evalúa la influencia de la distribución espacial de carga de la red, comparando los resultados con carga uniforme y no uniforme. En el caso de la distribución de tráfico uniforme, todas las celdas tienen el mismo valor máximo de factor de ocupación, mientras que en el caso no uniforme esta distribución se genera variando los valores máximos en cada celda pero manteniendo inalterada la población de usuarios. Así, se consigue un factor de utilización de PRB de cada celda diferente, manteniendo la misma carga media de red que en el caso uniforme.

Tal como se indicó, se asume una configuración de antena MIMO 2x2, por lo que el número de posibles patrones de localización de CRSs es 3, que coincide con los posibles valores de PSS. Recuérdese que sólo se simula el enlace descendente.

Los esquemas de planificación de PSS simulados son:

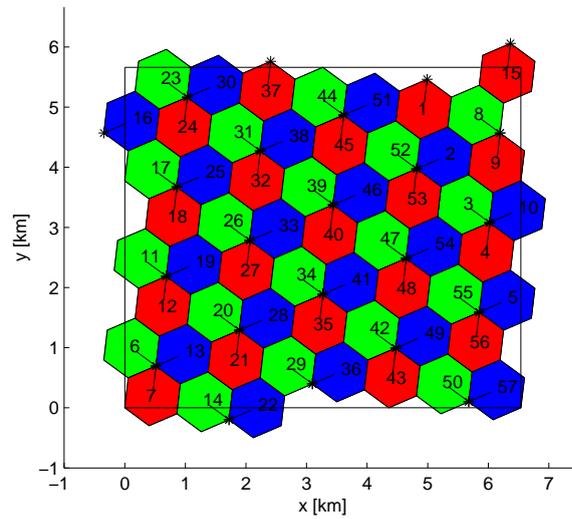
1. Esquema 0 (Ideal): Este primer esquema asume una planificación de PSS perfecta, de forma que se eliminan completamente las colisiones  $CRS \rightarrow CRS$ . La interferencia en las CRSs de otras celdas se origina solo a partir de REs utilizados para datos. Así, la SINR de CRS depende únicamente de la tasa de utilización de PRB de las celdas interferentes. Este esquema se utiliza como punto de referencia, y se corresponde con la configuración típica de la mayoría de los simuladores de nivel de sistema, donde la planificación de PCI no se tiene en cuenta.

2. Esquema 1a ( $\neq$  PSS, nTS): Este plan de PSS se construye a partir de una estrategia de pilotos decalados ( $\neq$  PSS) en una red no sincronizada temporalmente (*non-time synchronized*, nTS). Como el número de posibles desplazamientos en frecuencia está limitado a 3, existen algunas colisiones de CRSs, dado que el número de celdas vecinas es mayor que 2. Así, la interferencia de las CRS procede tanto de subportadoras de pilotos como de datos, dependiendo de la celda interferente en cuestión.

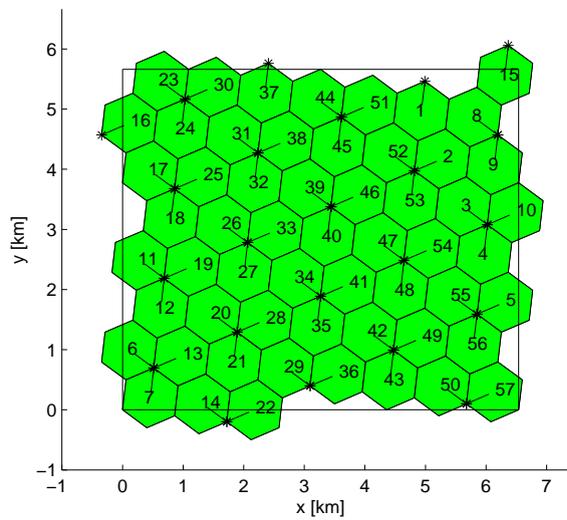
La Fig. 2.12(a) muestra la mejor manera de planificar los valores de PSS en un escenario trisectorial regular para evitar las colisiones de señales piloto. Cada color representa uno de los tres posibles desplazamientos (uno de los tres posibles valores de PSS). Debido a la simetría del escenario, el plan óptimo consiste en reutilizar los tres desplazamientos en frecuencia en cada emplazamiento. Es importante recalcar que, en este esquema, las colisiones de CRS son poco probables debido a la falta de sincronización temporal entre celdas (es decir, es poco probable que CRS de celdas distintas coincidan en el mismo símbolo).

3. Esquema 1b ( $\neq$  PSS, TS): Este plan de PSS se construye a partir de una estrategia de pilotos decalada ( $\neq$  PSS) en una red sincronizada temporalmente (TS). En este caso, el plan PSS es también el representado en la Fig. 2.12(a). Sin embargo, las CRSs están alineadas temporalmente, y, por lo tanto, las colisiones de señales pilotos son más probables.
4. Esquema 2a (= PSS, nTS): Este plan de PSS se construye a partir de una estrategia de pilotos alineados (= PSS) en una red no sincronizada temporalmente (nTS). El plan PSS resultante se presenta en la Fig. 2.12(b), donde se observa que todas las celdas tienen el mismo valor de PSS. Sin embargo, las colisiones de CRS aún son poco probables debido a la falta de sincronización.
5. Esquema 2b (= PSS, TS): Se construye el plan de PSS a partir de una estrategia alineada (= PSS) en una red sincronizada en el tiempo (TS). En este caso, las colisiones de CRs son frecuentes, ya que todas las estaciones base comparten la misma ubicación de las señales de referencia, tanto en tiempo como en frecuencia. Este esquema representa el caso peor y estaría representado igualmente por la Fig. 2.12(b).

Se propone un análisis multifactorial, que incluye ocho casos de uso a simular, definidos por las combinaciones de tipo de servicio (FB o VoIP), carga media



(a) Esquema con distintos PSS (Esquemas 1a/1b)



(b) Esquema con iguales PSS (Esquemas 2a/2b)

FIGURA 2.12: Plan de PSS representado en el escenario.

de la red (baja 30 % o alta 80 %) y distribución espacial de tráfico (uniforme o no uniforme). Por brevedad, únicamente se presentan los seis casos más significativos, que son los incluidos en la Tabla 2.2.

Para que la comparación de los métodos sea justa, la carga de la red se controla mediante la población de usuarios, que se mantiene constante para todos los esquemas. De esta manera, puede ocurrir que la carga de red difiera ligeramente entre esquemas, por los cambios en: a) los niveles de interferencia, y, por tanto, la eficiencia espectral del enlace, que causan que una misma conexión ocupe distinto número de PRBs, b) el control de acceso, que puede variar el número de llamadas bloqueadas, y c) la caída de llamadas. Concretamente, la carga exacta varía entre 25-30 % para las condiciones de carga baja y entre 70-80 % para carga alta, dependiendo del esquema simulado.

Se debe indicar que, cuando en una celda existe al menos un usuario del servicio *Full Buffer*, la carga de la celda es siempre del 100 %, ya que se le asignan todos los recursos libres. En este trabajo, se controla el valor de carga de red para el experimento con el servicio *Full Buffer* forzando que solo el X % de los recursos radio estén disponibles para usarse en cada celda. Esta restricción se impone en el planificador de recursos, que asignará exactamente el X % de los PRBs disponibles en el sistema, suponiendo que haya al menos un usuario en la celda.

Por otra parte, en el caso de la distribución de carga uniforme, todas las celdas tienen el mismo valor máximo de factor de ocupación, mientras que, en el caso no uniforme, dicho valor varía según la celda, pero manteniendo inalterada la población de usuarios. Así, el factor de utilización de PRB de cada celda será diferente, manteniendo un rango que resulte en una carga media de red igual al caso uniforme. La carga normalizada de la distribución no uniforme se representa en el escenario en la Fig. 2.13 mediante la probabilidad de inicio de llamada de los usuarios.

TABLA 2.2: Casos de uso simulados.

	<i>Full Buffer</i>		VoIP	
	30 %	80 %	30 %	80 %
Tráfico uniforme	✓	✓	✓	✓
Tráfico no uniforme	✓	✓	✗	✗

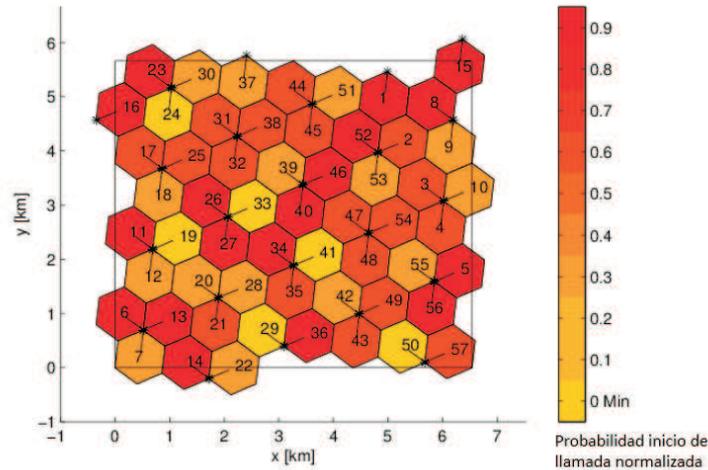


FIGURA 2.13: Distribución de carga no uniforme.

Para cada uno de los casos de uso descritos, se simulan los cinco esquemas de planificación de PSS explicados anteriormente. El diagrama de flujo del simulador dinámico empleado se detalla en la Fig. A.2.

La evaluación del desempeño de los esquemas se basa en distintos indicadores de rendimiento (*Key Performance Indicator*, KPI) según el servicio. Para el servicio FB, los indicadores utilizados son:

1. SINR de las CRS en el enlace descendente para usuarios del borde de celda y para usuarios promedios, definidos como el percentil del 5% y la mediana de la distribución de SINR de CRS, respectivamente. Este indicador se utiliza como medida de la calidad de señal de la conexión.
2. Distribución del indicador de la calidad del canal (CQI), como una medida de la eficiencia espectral del enlace.
3. Caudal de datos (*throughput*) de los usuarios de borde de celda y de los usuarios medios, definidos como el percentil del 5% y la mediana de la distribución de *throughput*, como una medida de la calidad de servicio de usuario.
4. Caudal de datos (*throughput*) medio de la celda en el enlace descendente, como una medida de la capacidad de la red.

Para los servicios VoIP, los indicadores utilizados son:

1. Ratio de llamadas bloqueadas (*Call Blocking Ratio*, CBR), como medida de la capacidad de la red, definido como:

$$CBR = \frac{N_{bloqueadas}}{N_{ofrecidas}} = \frac{N_{bloqueadas}}{N_{bloqueadas} + N_{cursadas}}, \quad (2.14)$$

donde  $N_{bloqueadas}$  es el número de llamadas bloqueadas por el control de acceso en el escenario debido a la falta de recursos radio, y  $N_{ofrecidas}$  y  $N_{cursadas}$  son el número total de llamadas intentadas y cursadas, respectivamente.

2. Ratio de llamadas caídas (*Call Dropping Ratio*, CDR), como una medida de la calidad de servicio, definido como:

$$CDR = \frac{N_{caídas}}{N_{finalizadas}} = \frac{N_{caídas}}{N_{caídas} + N_{exitosamentefinalizadas}}, \quad (2.15)$$

donde  $N_{caídas}$  es el número total de llamadas caídas debido a la falta de recursos o a una mala SINR durante un tiempo determinado (1 segundo en este trabajo).

A posteriori, se comprueba que el tiempo de red simulado (1 hora) resulta ser suficiente para obtener estimas robustas de estos indicadores, una vez agregados para todo el escenario. Por esta razón, en los resultados que se presentan a continuación no se incluyen los intervalos de confianza, que son despreciables.

### 2.3.3.2. Análisis de resultados

Por claridad, se presentan en primer lugar los resultados del servicio *Full Buffer* y posteriormente los del servicio VoIP.

#### a) Servicio *Full Buffer*

En primer lugar, se evalúa la calidad de conexión obtenida con diferentes esquemas de planificación de PSS. La Fig. 2.14(a) muestra la distribución de SINR de CRS en el enlace descendente obtenida por los usuarios *Full Buffer* con una carga media de red baja (es decir, una utilización de los PRB de aproximadamente el 30%). Como se esperaba, el Esquema 0 (caso ideal, donde no existen colisiones de CRS) obtiene los mayores valores de SINR. En contraste, los planes de PSS con

TABLA 2.3: SINR de CRSs en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ).

Esquema de plan de PSS	0	1a	1b	2a	2b
DL CRS SINR (percentil 5 %) [dB]	-3.26	-3.86	-4.64	-6.87	-8.61
DL CRS SINR (percentil 50 %) [dB]	9.01	7.98	7.78	5.54	3.86

pilotos alineados (Esquemas 2a y 2b) obtienen los peores rendimientos. Igualmente, los planes no sincronizados en tiempo (1a y 2a) superan a sus equivalentes que sí tienen sincronización temporal (1b y 2b, respectivamente).

De las curvas, se puede concluir que un plan apropiado de PSS puede evitar la mayoría de las colisiones de CRS en el caso de un esquema no sincronizado temporalmente, lo que es evidente por la pequeña diferencia que existe entre el Esquema 0 (ideal) y el Esquema 1a (real).

Más importante aún es el hecho de que la forma de las curvas se mantiene para los distintos esquemas. Así, las distribuciones de SINR de los esquemas reales son simplemente versiones desplazadas del esquema ideal. Por lo tanto, se puede concluir también que todos los usuarios (tanto los del centro como los del borde de celda) experimentan aproximadamente el mismo decremento en la SINR de las señales pilotos debido a un plan inadecuado de PSS. Este decremento puede cuantificarse fácilmente calculando la magnitud del desplazamiento, que puede interpretarse como un incremento de los niveles medios de interferencia. Un análisis más detallado muestra que este factor de decremento de la SINR para el caso peor (Esquema 2b) comparado con el caso ideal (Esquema 0) resulta ser de un factor de  $10 \log L$ , donde  $L$  es la carga media de la red. Para apoyar esta afirmación, la Tabla 2.3 muestra los valores del percentil del 5 % (es decir, de borde de celda) y valores medios de la SINR de los pilotos. Se observa que la diferencia de SINR en el enlace descendente en el borde de celda entre el mejor y el peor esquema de planificación de PSS es 5.14 dB ( $\approx 10 \log(0.3)$ ), lo que también ocurre para el valor de SINR media.

Para el caso de carga alta (es decir, 80 %), todos los esquemas de PSS tienen aproximadamente los mismos rendimientos, como se observa en la Fig. 2.14(b). Con esta carga de utilización de PRB tan alta, la probabilidad de colisión con un RE de datos ocupado se aproxima a la de colisionar con un piloto (es decir, se aproxima a 1). La Tabla 2.4 confirma la estimación para distintos planes de PSS. En este caso, la diferencia entre el mejor y el peor esquema de planificación es solo de 1.64 dB ( $\approx 10 \log(0.8)$ ).

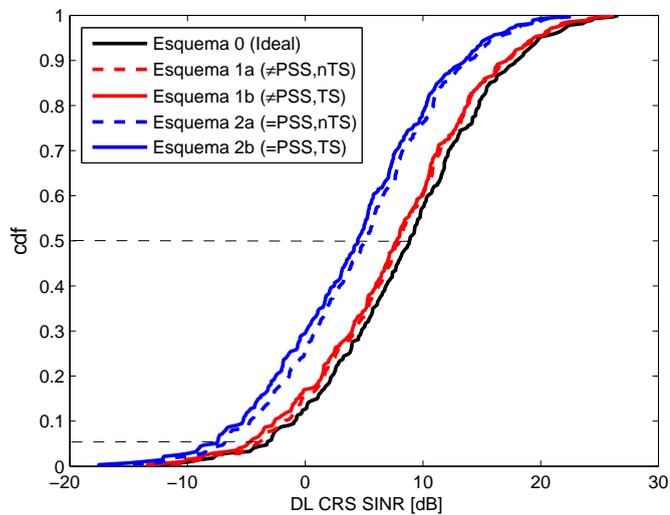
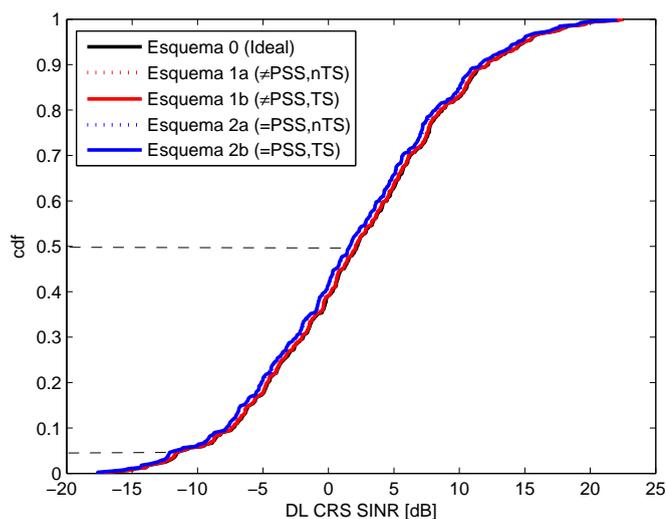
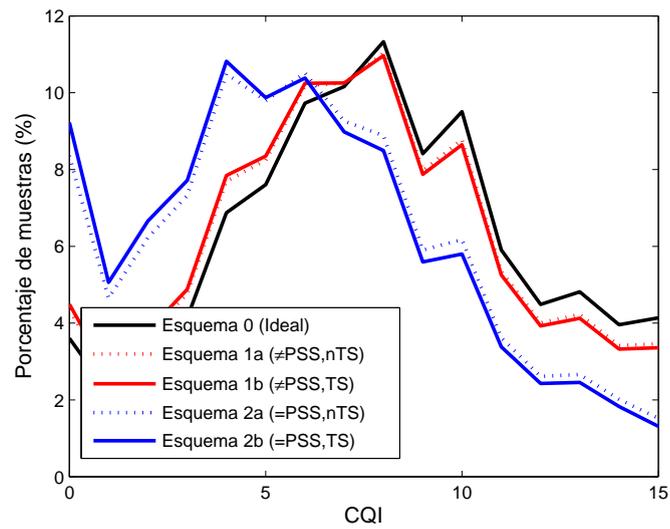

 (a) Carga baja ( $L=30\%$ )

 (b) Carga alta ( $L=80\%$ )

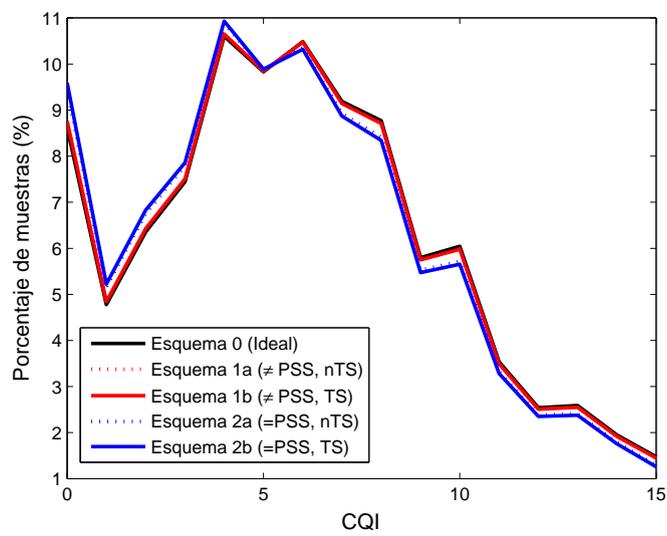
FIGURA 2.14: Distribución de SINR de CRS para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB).

 TABLA 2.4: SINR de CRSs en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ).

Esquema de plan de PSS	0	1a	1b	2a	2b
DL CRS SINR (percentil 5%) [dB]	-11.11	-11.10	-11.02	-12.08	-12.14
DL CRS SINR (percentil 50%) [dB]	2.23	2.06	1.98	1.64	1.58



(a) Carga de red baja



(b) Carga de red alta

FIGURA 2.15: Distribución de CQI para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB).

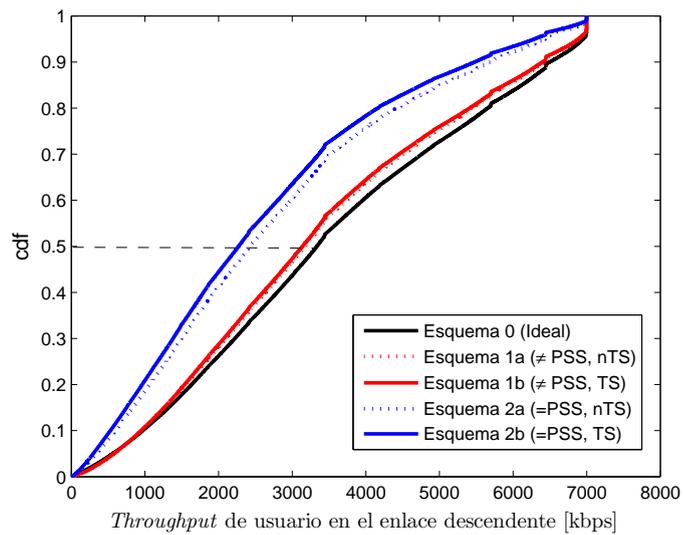
Las figuras 2.15(a) y 2.15(b) muestran las distribuciones de CQI obtenidas para carga baja y carga alta, respectivamente. En el escenario con carga baja, el valor medio de CQI se degrada de 9.4 en el Esquema 0 a 7.5 en el Esquema 2b. Es importante subrayar que el número de muestras con el valor de CQI más alto posible (CQI=15) es mayor en los Esquemas 0, 1a y 1b que en los Esquemas 2a y 2b. Así, los MCS más efectivos raramente se utilizan en estos últimos esquemas, lo que lleva a un *throughput* de usuario de pico menor para los usuarios del centro de celda.

Por el contrario, la Fig. 2.15(b) muestra que, para valores altos de carga, todos los esquemas presentan la misma distribución de CQI, como se esperaba. Cuando se compara la Fig. 2.15(a) y la Fig. 2.15(b), se observa que los valores de CQI para todos los esquemas son menores (peores) para el caso de carga alta. Esto es así por haber una mayor utilización de PRBs y, por lo tanto, una mayor probabilidad de colisión (interferencia). Como consecuencia, se acaban seleccionando esquemas de modulación más robustos para compensar los valores bajos de SINR.

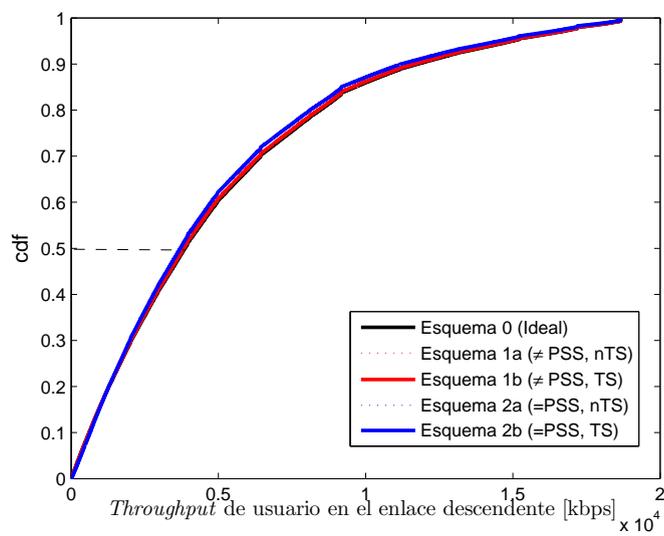
La Fig. 2.16(a) representa la calidad de servicio ofrecida al usuario del servicio FB en términos de *throughput* en el enlace descendente para una red con baja carga. Para todos los esquemas, el *throughput* de usuario varía desde 0 a 6.99 Mbps ( $\approx 1 \text{ Mbps/PRB} * 25 \text{ PRBs} * 0.3 \text{ carga de la red}$ ). De nuevo, se observa que los Esquemas 1a y 1b obtienen mejores prestaciones que los Esquemas 2a y 2b, aproximándose al caso ideal.

Por otra parte, la distancia horizontal entre las curvas sugiere que el impacto de la planificación de PSS en el *throughput* de usuario es mayor para usuarios de borde de celda y usuarios medios, que para los mejores usuarios (usuarios de centro de celda). Específicamente, se observa un decremento del 48 % (es decir, de 588 a 297 kbps) en el *throughput* de los usuarios de borde de celda, mientras que se observa un decremento del 31 % para los usuarios medios. Este decremento se debe al hecho de utilizar MCSs menos efectivos, debido a la subestimación de las condiciones del canal por las colisiones entre pilotos.

Por el contrario, la Fig. 2.16(b) muestra que el impacto de la planificación de PSS en el *throughput* de usuario es despreciable para cargas de red altas. En este caso, el rango del *throughput* de usuario va de 0 a 18.68 Mbps ( $\approx 1 \text{ Mbps/PRB} * 25 \text{ PRBs} * 0.8 \text{ carga de la red}$ ). Más específicamente, la Tabla 2.6 muestra que los usuarios de borde de celda y los usuarios medios experimentan un decremento del



(a) Carga baja



(b) Carga alta

FIGURA 2.16: Distribución de *Throughput* de usuario en el enlace descendente para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB).

TABLA 2.5: Distribución de *Throughput* de usuario en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ).

Esquema de plan de PSS	0	1a	1b	2a	2b
DL THRU (percentil 5%) [kbps]	588	579	561	344	297
DL THRU (percentil 50%) [Mbps]	3.33	3.18	3.14	2.41	2.27
DL THRU (percentil 100%) [Mbps]	6.99	6.97	6.9	6.87	6.82

TABLA 2.6: Distribución de *Throughput* de usuario en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ).

	0	1a	1b	2a	2b
DL THRU (percentil 5%) [kbps]	340	338	305	303	293
DL THRU (percentil 50%) [Mbps]	3.87	3.83	3.83	3.71	3.70
DL THRU (percentil 100%) [Mbps]	18.68	18.68	18.67	18.65	18.6

TABLA 2.7: *Throughput* de celda en el enlace descendente con carga baja ( $L=30\%$ ).

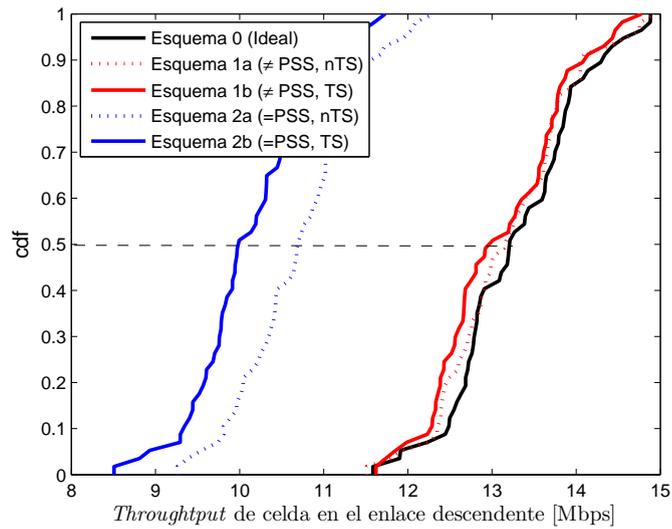
	S0	S1a	S1b	S2a	S2b
DL cell THRU (50%) [Mbps]	13.21	13.17	13.01	10.7	9.99

TABLA 2.8: *Throughput* de celda en el enlace descendente con carga alta ( $L=80\%$ ).

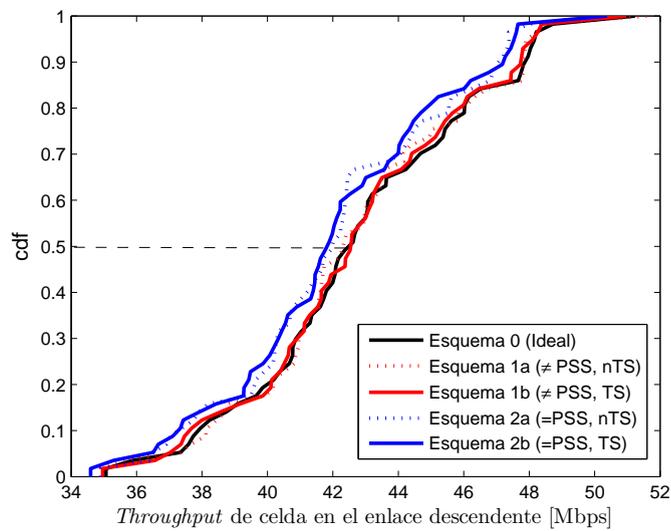
	S0	S1a	S1b	S2a	S2b
DL cell THRU (50%) [Mbps]	42.67	42.58	42.41	42.22	41.98

*throughput* de solamente 47 kbps y 170 kbps, respectivamente (es decir, 13.82% y 4.4%). A la luz de estos resultados, se concluye que el *throughput* de usuario decrece con los esquemas de pilotos alineados.

Las diferencias observadas en el *throughput* de usuario se trasladan al *throughput* de celda. Las Fig. 2.17(a) y 2.17(b) muestran la distribución del *throughput* de celda en el enlace descendente para carga baja y alta, respectivamente. Hay que resaltar que el *throughput* de celda cambia a lo largo de la simulación debido a la aleatoriedad introducida en la generación de llamadas y movilidad de los usuarios. Así, en lo que sigue, el análisis se centra en el *throughput* de celda medio. En la Fig. 2.17(a), se observa que, para baja carga de red, el *throughput* de celda decrece hasta un 24.37% con el Esquema 2b, en comparación con el Esquema 0. Igualmente, la Fig. 2.17(b) muestra que el *throughput* medio de celda solo decrece un 1.61% con el Esquema 2b comparado con el Esquema 0 para el caso de carga alta. De la forma de las curvas, se deduce que las variaciones del *throughput* de celda en el enlace descendente son similares para todos los esquemas de planificación.



(a) Carga baja



(b) Carga alta

FIGURA 2.17: Distribución de *Throughput* de celda en el enlace descendente para distintos esquemas de planificación de PSS (servicio FB).

Para concluir con el estudio del servicio FB, se evalúa el impacto de la distribución espacial de usuarios, comparando los resultados de los métodos con las distribuciones de carga de celda uniforme y no uniforme. Con este propósito, el factor de utilización de PRB máximo se fija a diferentes valores en cada celda del escenario.

Las Fig. 2.18 y Fig. 2.19 presentan las distribuciones de los valores de SINR y CQI del enlace descendente obtenidos por los métodos con distribución de carga uniforme y no uniforme. Por brevedad, se presenta únicamente el caso de carga baja, ya que, como se concluyó de experimentos anteriores, para el caso de carga alta no hay diferencias entre esquemas de planificación. Por claridad, solo se representan en la figura los esquemas mejor y peor de cada caso (es decir, Esquema 0 y 2b, respectivamente). Estos ofrecen los límites superior e inferior del rendimiento obtenido con distintos planes de PSS.

En las Fig. 2.18(a) y 2.18(b) puede observarse que, en el caso de los pilotos alineados (Esquema 2b), el resultado es el mismo para el caso de tráfico uniforme y no uniforme. Esto es así porque el factor de carga de la celda no tiene influencia en este caso. Como hay colisiones de pilotos entre todas las celdas, la calidad de la conexión se estima asumiendo que todas las vecinas están totalmente cargadas, independientemente de la carga real de la celda. Por esta razón, la SINR de las señales de referencia y las curvas de CQI en estos dos casos están superpuestas. Incluso para el plan de PSS ideal, con pilotos perfectamente decalados (Esquema 0), las diferencias entre tráfico no uniforme y uniforme son muy pequeñas. Tales diferencias se deben únicamente al ruido estocástico de la simulación originado por los cambios en las cargas de celda causados por intervalos cortos de tiempo en los que no existen usuarios en una celda. Además, las variaciones son las mismas para los usuarios de borde de celda y los usuarios de centro de celda, representados por percentiles bajos y medios de la distribución, respectivamente. Dado que el desplazamiento entre las curvas es también pequeño, se concluye que la influencia de la distribución espacial de usuarios en la SINR de pilotos y en el CQI es pequeña.

No ocurre lo mismo en el *throughput* de usuario o el *throughput* de celda, donde se observan mayores diferencias entre los resultados de la distribución de carga uniforme o no uniforme. En la Fig. 2.19(a) se observa un intervalo de valores de *throughput* más amplio en el caso de tráfico no uniforme. En particular, el *throughput* máximo de usuario es de 14 Mbps en el caso de tráfico no uniforme y 7 Mbps en el caso de tráfico uniforme. Esto se debe a que este *throughput* está

fuertemente relacionado con el factor de utilización de PRB de las celdas, que es el mismo para todas las celdas en el caso de tráfico uniforme, pero diferente en el caso de tráfico no uniforme. Esta variabilidad se traduce en una dispersión mayor de valores de *throughput* de usuario en el caso no uniforme, lo que conlleva que el *throughput* de pico de usuario aumente y el *throughput* de usuario de borde de celda se reduzca con una distribución desigual de carga. A partir de los valores que se observan en la figura, se deduce que, para el tráfico no uniforme, el rendimiento global de los usuarios de borde de celda con el Esquema 0 (ideal) es un 43.3% mayor que con el Esquema 2b (es decir, de 295 a 167 kbps), que es menor que la diferencia con tráfico uniforme (48%).

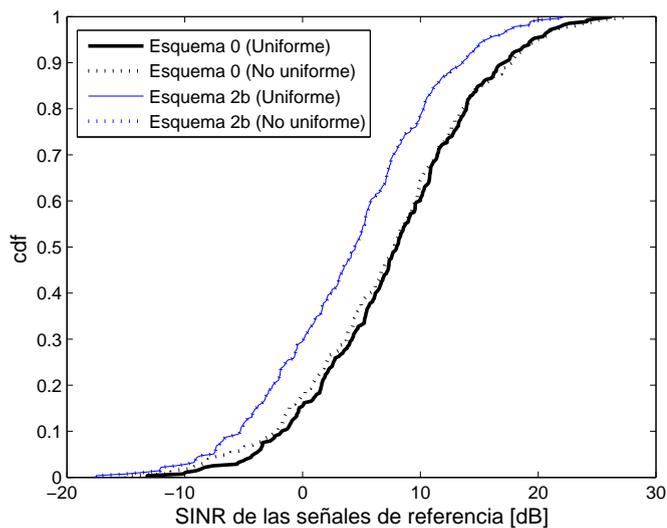
La Fig.2.19(b) muestra la distribución del *throughput* de celda con los dos patrones de carga. El *throughput* de celda se calcula agregando los valores de *throughput* individuales de los usuarios. Por lo tanto, se espera también un margen más amplio de valores en el caso de tráfico no uniforme. En este caso, el *throughput* medio de celda con el Esquema 0 es un 26.24% mayor que con el Esquema 2b (es decir, de 15.3 a 11.3 Mbps), superior a las diferencias obtenidas en el caso de tráfico uniforme (24.3%).

Como en el caso de *throughput* de usuario, en el caso de *throughput* de celda, las curvas mantienen la misma forma entre un esquema y otro. Por lo tanto, las conclusiones obtenidas para el caso de distribución uniforme son extrapolables al caso de distribución no uniforme.

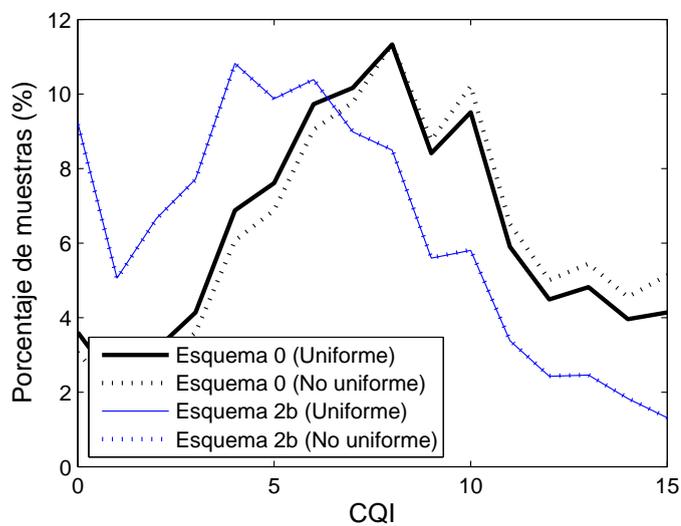
## b) Servicio VoLTE

Para abreviar el análisis del servicio VoIP, el estudio se restringe al caso de distribución espacial de carga uniforme. Se debe precisar que la generación de tráfico en VoIP se configura según la población de usuarios y la tasa de llamadas de llegada, a diferencia del caso del servicio *Full Buffer*, donde se hacía según la utilización máxima de PRBs. Así, el factor o ratio de utilización de PRB en el caso de VoIP fluctúa con el tiempo, causando que las variaciones estocásticas en los indicadores de rendimiento sean mayores.

Las Fig. 2.20(a) y 2.20(b) muestran las tasas de bloqueo y caída de llamadas (CBR y CDR) obtenidas con los diferentes esquemas de planificación para carga

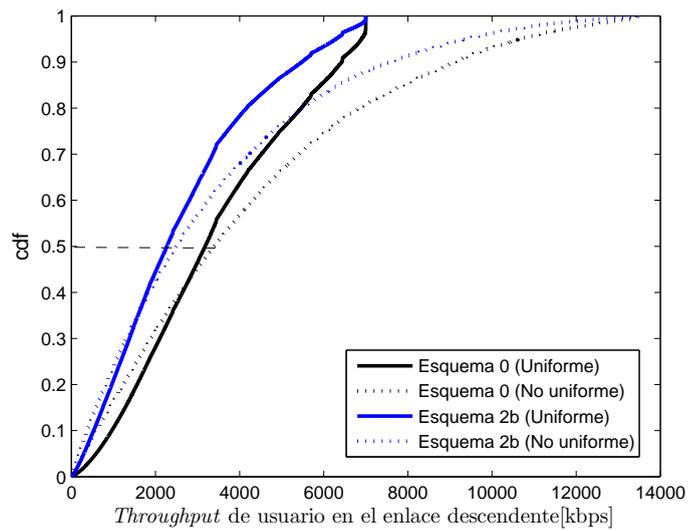


(a) SINR de las señales de referencia en el enlace descendente

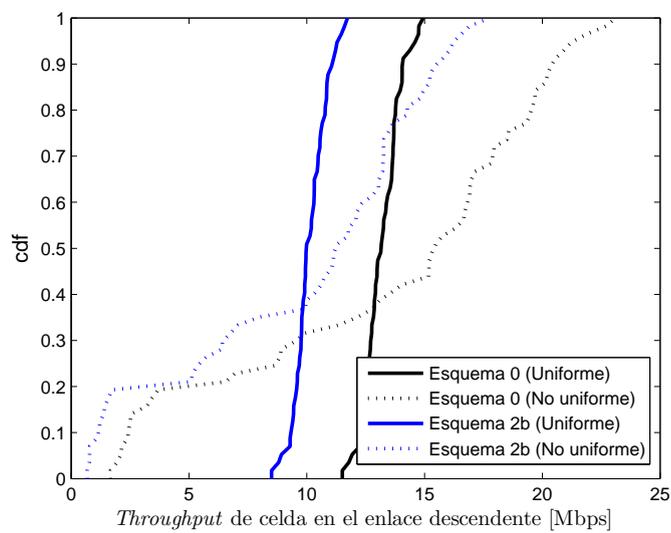


(b) CQI

FIGURA 2.18: Distribución de SINR y CQI con carga uniforme y no uniforme (servicio FB).



(a) *Throughput* de usuario en el enlace descendente



(b) *Throughput* de celda en el enlace descendente

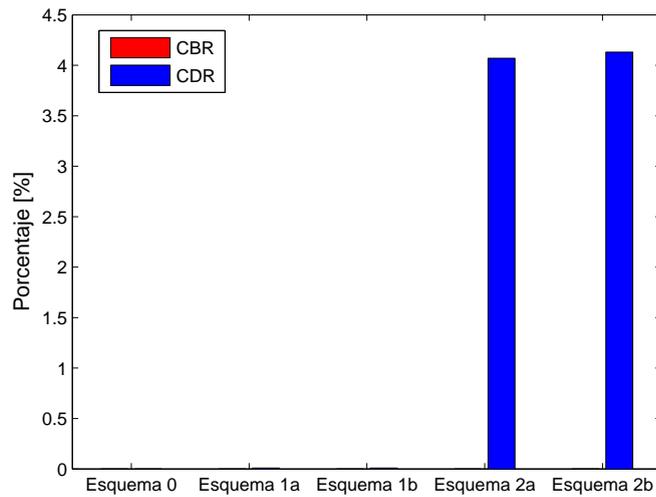
FIGURA 2.19: Distribución de *throughput* de usuario y celda con distribución de carga uniforme y no uniforme (servicio FB).

de red baja y alta, respectivamente. En ambas figuras, se observa que, en términos de calidad de la conexión, el Esquema 2b muestra los peores valores de CDR. En particular, para este esquema, los valores se corresponden con un 4.2% y un 7.02% para el caso de carga baja y alta, respectivamente, comparado con un 0% y un 5.1% para el caso del Esquema 1a. Como se ha comentado anteriormente, los Esquemas 2a y 2b subestiman la calidad del canal, lo que causa que se utilicen modulaciones más robustas. Como consecuencia, la utilización de recursos es mayor, lo que conlleva más llamadas caídas por exceso de interferencia, y más llamadas bloqueadas por falta de recursos.

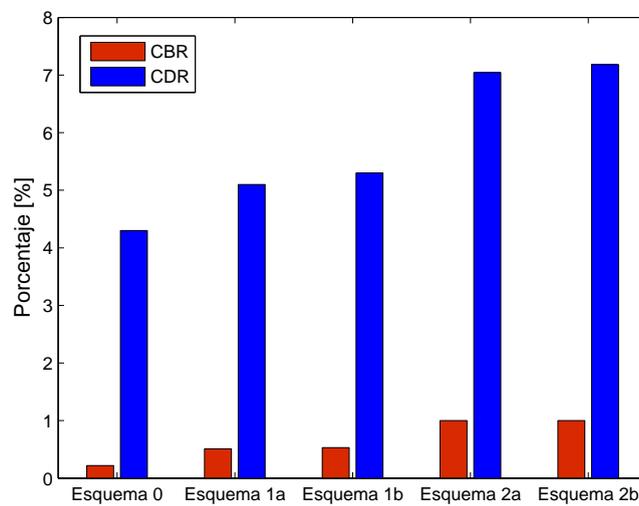
Un análisis más detallado prueba que los cambios de eficiencia espectral entre los métodos causan que, para la misma población de usuarios, la carga de la red varía de un 90% con un Esquema 2b a un 70% con un Esquema 0 para el caso de carga alta. Igual que para el servicio *Full Buffer*, las diferencias entre los distintos esquemas con el servicio VoIP son menores con carga alta que con carga baja. Así se concluye que, también en VoIP, los esquemas con CRS desplazadas en frecuencia presentan mejores rendimientos que los esquemas con CRS alineadas, y que las mejoras de rendimiento son relevantes sólo en caso de tener carga baja en la red, siendo irrelevantes en el caso de carga alta.

### 2.3.4. Conclusiones

En este apartado se ha llevado a cabo un análisis del impacto de la planificación de PCI en el rendimiento del enlace descendente de LTE. Con este propósito, se ha desarrollado un modelo de interferencia que considera, además del entorno de propagación y de la distribución de carga espacio-temporal, las posibles colisiones entre las señales de referencia de celdas vecinas debidas a la planificación de PSS. Este modelo de interferencia se ha adaptado tanto a redes sincronizadas temporalmente como a redes no sincronizadas. Se han seleccionado dos esquemas de planificación a considerar, uno con las señales de referencias decaladas y otro con estas señales alineadas en frecuencia. Por lo tanto, se han definido cuatro esquemas de planificación a simular, mediante las combinaciones de ausencia/existencia de alineamiento de señales de referencia y sincronización en la red. Como referencia de comparación, se incluye además el método ideal que asume ausencia total de colisiones entre señales de referencia de celdas vecinas.



(a) Escenario carga baja



(b) Escenario de carga alta

FIGURA 2.20: Tasas de bloqueo y caída de llamadas para distintas cargas de red (servicio VoIP, carga uniforme).

Para comparar las prestaciones de estos esquemas, el modelo de interferencia definido se ha introducido en un simulador dinámico LTE de nivel de sistema, con un escenario macrocelular formado por 57 sectores uniformemente distribuidos. Se ha estudiado el impacto de la planificación PCI en servicios *Full Buffer* y VoLTE a partir de diferentes indicadores de rendimiento. Para el caso *Full Buffer*, se ha utilizado la distribución de SINR en las CRSs, la distribución de CQI, el *throughput* de usuario y *throughput* de celda. Para el caso VoLTE, se han utilizado las tasas de caída y bloqueo de llamadas. Además, se ha estudiado el impacto del nivel de carga medio de la red y la distribución espacial de carga del sistema en el rendimiento de los métodos para el servicio *Full Buffer*.

De los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- a) Una planificación de PSS con las señales de referencia decaladas en frecuencia asegura un rendimiento próximo al que se obtiene con el esquema ideal, incluso para el caso de red no sincronizada temporalmente.
- b) Una planificación de PSS con las señales de referencia CRS alineadas en frecuencia empeora considerablemente las prestaciones de la red, sobre todo en redes poco cargadas.
  - Con carga baja, el *throughput* de usuario se reduce a la mitad para los usuarios de borde de celda, y a dos terceras partes en los usuarios del centro de celda. Esto se traduce en un decremento del *throughput* de celda del 25 %.
  - En el caso de carga alta, las prestaciones de los distintos esquemas tienden a igualarse conforme aumenta la carga, hasta igualarse del todo con carga del 100 %.
- c) La distribución espacial de usuarios no afecta de forma significativa en el rendimiento de los esquemas de planificación, obteniéndose resultados similares con distribución espacial de carga de celda uniforme y no uniforme. Así, las conclusiones extraídas para el caso uniforme son extrapolables al caso no uniforme.
- d) En el caso del servicio VoLTE, el impacto es mayor en redes poco cargadas, al igual que para el servicio *Full Buffer*. Concretamente, se observa una variación de CDR del 0 % al 4.2 % en el caso de carga baja, entre los esquemas

decalado y alineado. Estas variaciones son menores en el caso de carga alta, del 5.1 % al 7.2 %.

## 2.4. Modelo de sistema del enlace ascendente

En esta sección, se evalúa el impacto de la planificación de PCI en el canal de control del enlace ascendente de LTE (PUCCH), causado por las colisiones de las señales de referencia de demodulación (DM RS). Al igual que se hizo para el enlace descendente, se desarrolla un nuevo modelo analítico para cuantificar el impacto de la planificación de PCI en la probabilidad de fallo del PUCCH. El modelo de rendimiento del PUCCH propuesto se incluye en un simulador estático de nivel de sistema, con el que se cuantifica el impacto de la asignación de PCI en la probabilidad de fallo del PUCCH en un escenario real.

### 2.4.1. Técnicas de protección del PUCCH

A continuación se clarifica bajo qué condiciones dos usuarios colisionan debido a sus señales de referencia DM RS, y cómo estas condiciones dependen del plan de PCI. Para ello, primero se describen los formatos de trama que soporta el canal PUCCH. Posteriormente, se analizan las técnicas de protección a nivel de sistema asociadas a las señales de referencia. Estas técnicas incluyen la secuencia de grupo, el desplazamiento cíclico, la multiplexación de código y el salto de código (*hopping*). De esta explicación, se deduce la capacidad del PUCCH de una celda, para después estimar la probabilidad de que dos usuarios colisionen en el PUCCH por sus señales de referencia DM RS.

Es importante resaltar que, como se ha comentado anteriormente, en el PUCCH pueden transmitir varios usuarios de forma simultánea mediante la asignación de diferentes regiones/PRBs, basándose en la multiplexación por división de frecuencia (FDM). Además, varios usuarios pueden compartir la misma región PUCCH mediante multiplexación por división de código (CDM), como se detalla más adelante.

#### 2.4.1.1. Formatos de trama en el PUCCH

La Tabla 2.9 presenta los diferentes formatos de trama del PUCCH. El formato 1 se utiliza para peticiones de recursos al planificador (*Scheduling Request*, SR), los formatos 1a/1b para acuses de recibo en los mecanismos de retransmisión automática (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ), y los formatos 2/2a/2b

TABLA 2.9: Formato de trama del PUCCH [3].

Formato	Información de control del canal ascendente	Capacidad de multiplexado <small>[#UE/RB]</small>
1	<i>Scheduling request</i> (SR)	36, 18, 12
1a	1-bit HARQ ACK/NACK con/sin SR	36, 18, 12
1b	2-bit HARQ ACK/NACK con/sin SR	36, 18, 12
2	CQI (20 bits de código)	12, 6, 4
2a	CQI y 1-bit HARQ ACK/NACK (20+1 bits de código)	12, 6, 4
2b	CQI y 2-bit HARQ ACK/NACK (20+2 bits de código)	12, 6, 4

para envío del indicador de calidad del canal (CQI). La tabla además presenta la capacidad de multiplexación de cada formato, reflejando el número máximo de usuarios por PRB. El cálculo de estas cifras en función de los parámetros de multiplexación se explica más adelante.

La Fig. 2.21 muestra cómo las transmisiones en el PUCCH se agrupan por formatos de trama en subregiones de frecuencia, que se extienden a lo largo de uno o varios PRBs. Los formatos PUCCH 2/2a/2b (dedicados a transmisiones del CQI) se mapean en los extremos del ancho de banda del sistema, mientras los formatos 1/1a/1b PUCCH SR/HARQ (para transmisiones SR/ACK/NACK) se transmiten en los PRBs interiores. Los identificadores #0, #1 y #2 se utilizan para distinguir entre tramas de igual formato.

La Fig. 2.22 representa la estructura temporal de los diferentes formatos de trama del PUCCH a nivel de símbolo. RS representa la ubicación de las señales de referencia, LB es un bloque largo (*Long Block*) y CP se refiere al prefijo cíclico (*Code Prefix*). La Fig. 2.22(a) muestra que, en los formatos 1/1a/1b, los símbolos #3, #4 y #5 se usan para DM RS. En cambio, la Fig. 2.22(b) muestra que, para los formatos 2/2a/2b, sólo los símbolos #2 y #6 se utilizan para DM RS.

#### 2.4.1.2. Transmisiones simultáneas en el PUCCH

A continuación, se describen las técnicas utilizadas en el PUCCH para soportar transmisiones simultáneas, aumentando así su capacidad.

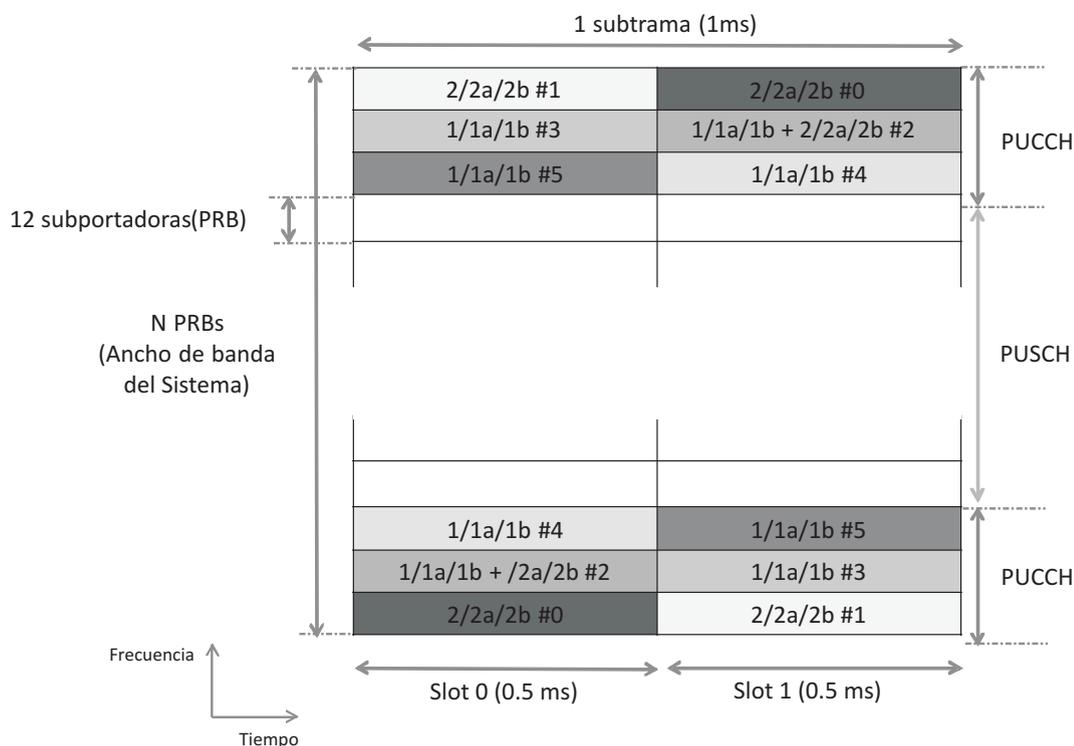
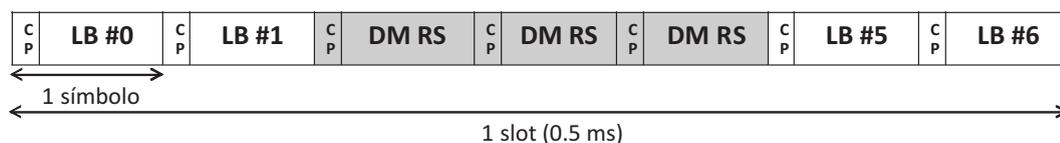
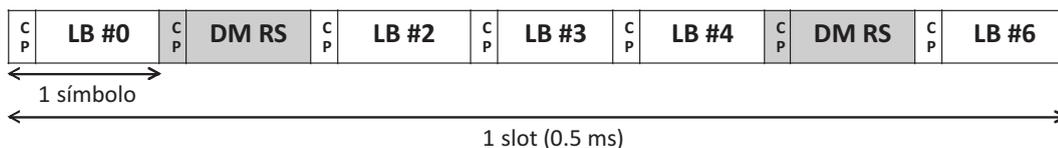


FIGURA 2.21: Recursos en tiempo y frecuencia para distintos formatos del PUCCH.



(a) Formatos 1/1a/1b



(b) Formatos 2/2a/2b

FIGURA 2.22: Estructura temporal de los diferentes formatos del PUCCH (con prefijo cíclico normal).

### a) Grupo de secuencia

Como se comentó anteriormente, las secuencias de las señales de referencia  $r_{u,v}^{(\alpha)}(n)$  se definen a partir de una secuencia base,  $\bar{r}_{u,v}(n)$ , y un desplazamiento cíclico,  $\alpha$ .

Como las señales de referencia DM RSs deben ocupar el mismo ancho de banda que los datos, al menos se necesita una secuencia RS de cada longitud  $N_m$  por celda para poder soportar todos los posibles tamaños de asignaciones de recursos a usuarios en el enlace ascendente. El número de posibles secuencias base de RS de cada longitud  $N_m$  varía con el número de PRBs asignados,  $m$ . El número mínimo de secuencias base para una cierta longitud es 30, obtenido para  $m \in \{1, 2, 3\}$  (es decir, asignaciones al usuario de 1, 2 ó 3 PRBs en el enlace ascendente) [24]. Así, el conjunto completo de secuencias disponibles se divide en 30 grupos de secuencias sin solapamiento entre ellas, incluyendo al menos una secuencia base de todas las longitudes (específicamente, 1 para  $m \in [1, 5]$  y 2 para longitudes mayores) [2].

Durante la planificación de la red, a cada celda se le asigna uno de estos grupos de secuencias, identificado por el índice de subgrupo  $u$ , donde  $u \in \{0, 1, \dots, 29\}$ .

En el caso concreto de  $m = 1$ , las secuencias base se obtienen según

$$\bar{r}_{u,v}(n) = e^{j\varphi(n)\pi/4}, 0 \leq n \leq M_{sc}^{RS} - 1 \quad (2.16)$$

donde  $u$  y  $v$  son el número de grupo y el número de la secuencia base dentro del grupo respectivamente,  $\varphi(n)$  representa el desplazamiento cíclico, y  $M_{sc}^{RS}$  es el número de subportadoras asignadas.

En la Fig. 2.23 se representan los diferentes valores de  $\varphi(n)$  para el caso de  $m = 1$  [2].

### b) Desplazamiento cíclico

En el PUCCH, varios usuarios simultáneos pueden compartir el mismo PRB. A todos estos usuarios se les asigna el mismo número de PRBs y, por tanto, tienen la misma longitud de secuencia base. Para soportar múltiples usuarios en un PRB, se puede aplicar un desplazamiento cíclico,  $\alpha$ , a las secuencias base. Idealmente, los desplazamientos cíclicos de una misma secuencia base son totalmente ortogonales

$u$	$\varphi(0), \dots, \varphi(11)$											
0	-1	1	3	-3	3	3	1	1	3	1	-3	3
1	1	1	3	3	3	-1	1	-3	-3	1	-3	3
2	1	1	-3	-3	-3	-1	-3	-3	1	-3	1	-1
3	-1	1	1	1	1	-1	-3	-3	1	-3	3	-1
4	-1	3	1	-1	1	-1	-3	-1	1	-1	1	3
5	1	-3	3	-1	-1	1	1	-1	-1	3	-3	1
6	-1	3	-3	-3	-3	3	1	-1	3	3	-3	1
7	-3	-1	-1	-1	1	-3	3	-1	1	-3	3	1
8	1	-3	3	1	-1	-1	-1	1	1	3	-1	1
9	1	-3	-1	3	3	-1	-3	1	1	1	1	1
10	-1	3	-1	1	1	-3	-3	-1	-3	-3	3	-1
11	3	1	-1	-1	3	3	-3	1	3	1	3	3
12	1	-3	1	1	-3	1	1	1	-3	-3	-3	1
13	3	3	-3	3	-3	1	1	3	-1	-3	3	3
14	-3	1	-1	-3	-1	3	1	3	3	3	-1	1
15	3	-1	1	-3	-1	-1	1	1	3	1	-1	-3
16	1	3	1	-1	1	3	3	3	-1	-1	3	-1
17	-3	1	1	3	-3	3	-3	-3	3	1	3	-1
18	-3	3	1	1	-3	1	-3	-3	-1	-1	1	-3
19	-1	3	1	3	1	-1	-1	3	-3	-1	-3	-1
20	-1	-3	1	1	1	1	3	1	-1	1	-3	-1
21	-1	3	-1	1	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	-3
22	1	1	-3	-3	-3	-3	-1	3	-3	1	-3	3
23	1	1	-1	-3	-1	-3	1	-1	1	3	-1	1
24	1	1	3	1	3	3	-1	1	-1	-3	-3	1
25	1	-3	3	3	1	3	3	1	-3	-1	-1	3
26	1	3	-3	-3	3	-3	1	-1	-1	3	-1	-3
27	-3	-1	-3	-1	-3	3	1	-1	1	3	-3	-3
28	-1	3	-3	3	-1	3	3	-3	3	3	-1	-1
29	3	-3	-3	-1	-1	-3	-1	3	-3	3	1	-1

 FIGURA 2.23: Valores de  $\varphi(n)$  para la generación de las secuencias base [2].

entre sí, a diferencia de cualesquiera otras dos secuencias bases (correspondientes a usuarios en celdas diferentes), que presentan una correlación cruzada no nula (pequeña, pero no nula). Esta propiedad hace de los desplazamientos cíclicos la mejor opción para separar usuarios que están transmitiendo en el mismo conjunto de subportadoras.

Para una señal de referencia DM RS, existen 12 posibles desplazamientos cíclicos, pero algunos de ellos pueden no estar disponibles en una celda. El motivo es que, en las transmisiones de ciertos formatos de trama, es necesario protegerse frente a la dispersión temporal del canal. Para ello, el parámetro de distancia circular,  $\Delta_{shift}$ , controla el número de desplazamientos cíclicos disponibles en una celda. Los valores posibles de  $\Delta_{shift}$  son 1, 2 y 3, que corresponden a 12, 6 o 4 desplazamientos cíclicos disponibles, respectivamente.

### c) Códigos de ensanchamiento

En los formatos de trama 1/1a/1b, empleados para señalización SR/ACK/-NACK, se puede usar además códigos de ensanchamiento en el dominio del tiempo para multiplexar usuarios por código. El número de códigos de ensanchamiento disponibles está limitado por el número de símbolos RS por ranura temporal (3, en este formato, como puede verse en la Fig. 2.22). Así, en los formatos 1/1a/1b, pueden multiplexarse hasta 36 ( $= 12 * 3$ ) usuarios ortogonalmente en el mismo PRB del PUCCH, como se muestra en la Tabla 2.9. En los formatos de trama 2/2a/2b, usados para reportar valores de CQI, los códigos de ensanchamiento en el dominio del tiempo no están disponibles, por lo que solo pueden multiplexarse hasta 12 usuarios en el mismo PRB del PUCCH.

### d) Aleatorización mediante salto de código de secuencia y desplazamiento cíclico

En LTE, la asignación del grupo de secuencias a una celda y el desplazamiento cíclico a un usuario puede ser fija o cambiar dinámicamente con el tiempo, siguiendo un patrón de salto. Ambos saltos persiguen aleatorizar la interferencia entre celdas, que en caso contrario se concentraría en un único usuario todo el tiempo. El precio a pagar es la incapacidad de optimizar la interferencia entre celdas mediante una planificación cuidadosa de las DM RSs de toda la red. Si está activo el salto de grupos de secuencia, el grupo de secuencia  $u$  asignado a cada celda en un instante de tiempo se determina mediante un patrón de salto de grupo de secuencia,  $f_{gh}$ , y un desplazamiento de grupo de secuencia,  $f_{ss}$ , de la siguiente forma

$$u(n_s) = (f_{gh}(n_s) + f_{ss}) \bmod 30, \quad (2.17)$$

donde  $n_s$  es el instante actual expresado en símbolos,  $f_{gh}$  es una secuencia pseudoaleatoria escogida de un conjunto de 17 posibles, y  $f_{ss}$  es un número entre 0 y 29. Así, hay 17 patrones de salto únicos para los grupos de secuencias, cada uno de los cuales puede estar desplazado mediante 30 desplazamientos de grupo de secuencia. El índice de la secuencia de salto,  $c_{init}$ , que determina cuál de los 17 patrones de salto originales se asigna a una celda  $c$ , viene dado por el PCI de la

celda,  $PCI(c)$ , por la expresión

$$c_{init}(c) = \left\lfloor \frac{PCI(c)}{30} \right\rfloor \in [0, 16] \quad (2.18)$$

donde  $PCI(c) \in \{0, \dots, 503\}$  [2]. De (2.18), se deduce que hasta 30 valores consecutivos de PCI pueden tener la misma secuencia,  $f_{gh}$ .

El índice del patrón de salto,  $c_{init}$  (y, por tanto, el patrón original de salto de grupos de secuencia,  $f_{gh}$ ) en una celda es el mismo para el PUCCH y el PUSCH. Sin embargo, el valor del desplazamiento de grupo de secuencia,  $f_{ss}$ , puede ser distinto en los dos canales. Para el caso del PUCCH,

$$f_{ss} = PCI(c) \bmod 30, \quad (2.19)$$

mientras que para el PUSCH,

$$f_{ss} = PCI(c) \bmod 30 + \Delta_{ss}, \quad (2.20)$$

donde  $\Delta_{ss}$  es un parámetro que permite desacoplar la asignación de grupos de secuencia de la asignación de PCI en el PUSCH, con  $\Delta_{ss} \in \{0, \dots, 29\}$ . Si el salto de secuencias está desactivado,  $u(n_s) = f_{ss}$ .

El salto del desplazamiento cíclico se añade sobre el salto de los grupos de secuencia. En el caso del PUSCH, el desplazamiento cíclico cambia cada ranura temporal (slot), mientras que en el PUCCH éste salta cada símbolo SC-FDMA.

De lo explicado, se puede concluir que, en el caso ideal, dos usuarios transmitiendo en el PUCCH colisionan cuando utilizan la misma secuencia base y el mismo desplazamiento cíclico en un mismo periodo de símbolo. Idealmente, los desplazamientos cíclicos de una misma secuencia son ortogonales, y evitan colisiones entre usuarios de la misma celda. Por lo tanto, las colisiones de código solo ocurren entre usuarios de diferentes celdas. Para que tenga lugar una colisión, debe ocurrir que:

1. las celdas servidoras de los dos usuarios tengan el mismo índice de grupo de secuencias base,  $u$  (lo cual depende de sus valores de PCI),
2. los dos usuarios estén asignados al mismo PRB dentro de los recursos reservados para el canal común de control (es decir, a la misma región del PUCCH), y

3. los dos usuarios tengan el mismo desplazamiento cíclico y código de ensanchamiento (cuando esté disponible).

La condición anterior corresponde al caso ideal, donde las secuencias base son totalmente ortogonales entre sí. En la práctica, las secuencias base no son perfectamente ortogonales, sobre todo aquéllas secuencias de longitud limitada (12 o 24 símbolos), como las utilizadas en el PUCCH [60]. Así, es posible que ocurran colisiones parciales entre usuarios del PUCCH con grupos de secuencia base y desplazamiento cíclico diferentes. El impacto de estas colisiones parciales depende del factor de ortogonalidad entre las secuencias asignadas a los usuarios a nivel de símbolo, lo que depende de cada pareja de secuencias.

## **2.4.2. Modelo de rendimiento del PUCCH**

Disponer de un modelo de rendimiento del PUCCH simple y preciso es esencial para evaluar la calidad de un plan de PCI sin la necesidad de simulaciones costosas en tiempo. En este apartado, se presenta una metodología para estimar la probabilidad de fallo del PUCCH debida a las colisiones de DM RS, que pueda implementarse después en una herramienta de planificación. En el modelo de rendimiento propuesto, la probabilidad de fallo del PUCCH obtenida con un plan de PCI se estima a partir de la probabilidad de colisión de las señales de referencia DM RS y los niveles de interferencia del PUCCH. El modelo propuesto cubre diferentes formatos de tramas del PUCCH (formatos 1/1a/1b y 2/2a/2b) y diferentes configuraciones de PCI (con o sin salto de código).

### **2.4.2.1. Cálculos de los niveles de interferencia en el PUCCH**

Como primer paso en el modelo, se estiman los niveles de interferencia recibidos en el PUCCH. Se asume que las técnicas de salto aseguran que el valor medio de interferencia de todas las ranuras temporales (es decir, los 14 símbolos SC-FDMA que forman un TTI con prefijo cíclico normal) es prácticamente constante. Así, la interferencia en el PUCCH puede caracterizarse por su valor medio. El nivel medio de interferencia en el PUCCH (en unidades naturales) es independiente del usuario, y se calcula, a nivel de celda, como la suma de la interferencia intracelda

e intercelda,

$$I(c) = I_{intra}(c) + \sum_{c' \neq c} I_{inter}(c, c') \quad , \quad (2.21)$$

donde  $I_{intra}(c)$  es el nivel medio de interferencia recibida debido a usuarios situados en la misma celda  $c$ , e  $I_{inter}(c, c')$  es el nivel medio de interferencia recibida en la celda  $c$  de usuarios situados en las celdas de alrededor  $c'$ . Todos los términos de interferencia se definen como el producto del número de usuarios interferentes, el nivel de señal de potencia recibida y el factor de protección contra interferencia, como

$$I_{intra}(c) = N_{us_{intra}}(c) \overline{P_{rx}(c, c)} X_{intra}, \quad (2.22)$$

$$I_{inter}(c, c') = \sum_{c' \neq c} N_{us_{inter}}(c') \overline{P_{rx}(c, c')} X_{inter}(c, c'), \quad (2.23)$$

donde  $N_{us_{intra}}(c)$  y  $N_{us_{inter}}(c')$  son el número medio de usuarios interferentes de la celda  $c$  y de las celdas colindantes  $c'$ ,  $\overline{P_{rx}(c, c)}$  y  $\overline{P_{rx}(c, c')}$  representan el nivel medio de señal recibido en la celda  $c$  de usuarios de la misma celda y de usuarios de celdas de alrededor, respectivamente, y  $X_{intra}$  y  $X_{inter}(c, c')$  son los factores de protección contra la interferencia obtenidos con la precodificación (es decir, con el desplazamiento cíclico y la multiplexación por división de código). Como se muestra después, el número de usuarios interferentes depende de la intensidad de tráfico en el canal de control de la celda interferente. De igual forma, el nivel medio de señal recibido depende del esquema de control de potencia en el enlace ascendente, y los factores de protección dependen del plan de PCI utilizado y de los ratios de utilización de los códigos.

### a) Número de usuarios interferentes

El número de usuarios interferentes en (2.22) and (2.23) dependen de la intensidad de tráfico en cada región PUCCH. Específicamente, el número medio de usuarios interferentes servidos por la misma celda se calcula a partir de la probabilidad de tener usuarios adicionales de la siguiente forma,

$$N_{us_{intra}}(c) = E[n_{us}(c) \geq 2 | n_{us}(c) \geq 1] = \sum_{n_{us}(c)=2}^{N_{us_{max}}} (n_{us}(c) - 1) \frac{p(n_{us}(c))}{p(n_{us}(c) \geq 1)}, \quad (2.24)$$

donde  $n_{us}(c)$  es una variable aleatoria que muestra el número de usuarios en la celda  $c$ , en un rango entre 0 y  $N_{us_{max}}$ ,  $N_{us_{max}}$  es el número máximo de usuarios

en la celda según el número de desplazamientos cíclicos y códigos disponibles, y  $p(n_{us}(c))$  es la probabilidad de tener  $n_{us}(c)$  usuarios activos en la celda  $c$  en la región PUCCH que se esté considerando. En (2.24), es importante resaltar que la probabilidad de tener usuarios interferentes en la misma celda está condicionada al hecho de que ya haya al menos un usuario en esa misma celda.

De igual forma, el número medio de usuarios interferentes de otras celdas  $c'$ , se calcula como:

$$N_{usinter}(c') = E[n_{us}(c')] = \sum_{n_{us}(c')=1}^{N_{usmax}} n_{us}(c') p(n_{us}(c')). \quad (2.25)$$

Por sencillez, se asume aquí que cada región del PUCCH puede tratarse de manera independiente (es decir, que la intensidad de tráfico se caracteriza a nivel de región y que la interferencia solo procede de usuarios que se encuentren en la misma región). En cada una de estas regiones del PUCCH, el proceso de llegada de peticiones por celda se modela como un proceso de Poisson con una tasa de llegadas  $\lambda(c)$ , y el tiempo medio de servicio de cada petición es una subtrama temporal (es decir, 1 ms). Con estas asunciones, la probabilidad de tener  $n_r$  peticiones por subtrama depende de la tasa de llegadas en la región PUCCH considerada, tal que

$$p(n_r) = \frac{e^{-(\lambda T)} (\lambda T)^{n_r}}{n_r!}, \quad (2.26)$$

donde  $\lambda$  es la tasa de llegada de peticiones al PUCCH de la celda por PRB (es decir, por región del PUCCH) y  $T$  es la duración de la subtrama (es decir, 1 ms). Es importante resaltar que  $\bar{n}_r = \lambda \cdot T$  es el número medio de peticiones PUCCH por subtrama/región en la celda en cualquier instante.

El número máximo de peticiones que pueden servirse por cada región del PUCCH en una subtrama está limitado por la capacidad del PUCCH. Teniendo este límite en cuenta, la probabilidad de servir  $n_{us}$  usuarios en una subtrama de una región del PUCCH puede expresarse a partir de la distribución de Poisson

como:

$$\begin{aligned}
p(n_{us}(c) = 0) &= e^{-\bar{n}_r} \\
p(n_{us}(c) = 1) &= e^{-\bar{n}_r} \cdot \bar{n}_r \\
p(n_{us}(c) = 2) &= \frac{e^{-\bar{n}_r} \cdot \bar{n}_r^2}{2!} \\
&\vdots \\
p(n_{us}(c) = N_{usmax}) &= p(n_r = N_{usmax}) + p(n_r = N_{usmax} + 1) + \dots + p(n_r = \infty),
\end{aligned} \tag{2.27}$$

donde  $n_r$  y  $n_{us}$  reflejan los usuarios llegados y servidos en una subtrama de una región del PUCCH. El valor de  $N_{usmax}$  depende del formato del PUCCH usado en la región del PUCCH considerada, y del valor del parámetro  $\Delta_{shift}$ . Una configuración típica es  $\Delta_{shift} = 2$ , lo que conlleva que  $N_{usmax} = 6$  ( $= 12/2$ ) para formatos de trama 2/2a/2b y  $N_{usmax} = 18$  ( $= 12/2*3$ ) para formatos 1/1a/1b.

Las probabilidades anteriormente descritas pueden relacionarse de manera sencilla con la carga del canal PUCCH,  $L_{PUCCH}$ , definida como la probabilidad de ocupación de ese canal, como

$$\begin{aligned}
L_{PUCCH}(c) &= 1 - p(n_{us}(c) = 0) = \\
&= p(n_{us}(c) = 1) + p(n_{us}(c) = 2) + \dots + p(n_{us}(c) = N_{usmax}).
\end{aligned} \tag{2.28}$$

## b) Nivel medio de interferencia

En (2.22) y (2.23), la interferencia media generada por los usuarios de la celda  $c'$  en la celda  $c$ ,  $\overline{P_{rx}(c, c')}$ , depende de la potencia transmitida en el enlace ascendente y las pérdidas de trayecto (*pathloss*), como

$$\overline{P_{rx}(c, c')} = E\left[\frac{P_{tx}(u)}{L_p(c, u)} \mid S(u) = c'\right], \tag{2.29}$$

donde  $P_{tx}(u)$  es la potencia transmitida del usuario  $u$  en la celda  $c'$ ,  $L_p(c, u)$  son las pérdidas de propagación (que incluyen ganancia de antena y desvanecimiento lento) del usuario  $u$  a la celda  $c$ , y  $S(u)$  es la celda servidora del usuario  $u$  (es decir, la celda interferente  $c'$ ).  $P_{tx}(u)$  se define a partir del esquema de control de potencia del enlace ascendente (PC), como se explica más adelante.

### c) Factores de protección frente a interferencia

Los factores de protección de interferencia en (2.22) y (2.23),  $X_{intra}$  y  $X_{inter}$ , dependen principalmente de las propiedades de correlación de las secuencias. Específicamente,

$$X_{intra} = \alpha_{cs-cdm_{intra}} , \quad (2.30)$$

donde  $\alpha_{cs-cdm_{intra}}$  es el factor de ortogonalidad entre versiones alineadas en tiempo de la misma secuencia base con diferentes precodificaciones (es decir, desplazamiento cíclico y código de multiplexación). Por definición, un factor de ortogonalidad igual a 0 conlleva máxima protección. Por el contrario, los factores de protección entre celdas,  $X_{inter}$ , además dependen del plan de PCI y del ratio de utilización de código. Para dicho factor, se distinguen dos situaciones dependiendo de la activación o no del salto de grupo de secuencias.

Caso 1: Salto de grupo de secuencias deshabilitado

Cuando el salto de grupo de secuencias está deshabilitado, las colisiones de DM RS ocurren entre celdas planificadas con igual  $PCI \bmod 30$ , de forma que

$$X_{inter}(c, c') = \begin{cases} \alpha_{cs-cdm_{inter}}(c, c') & \text{si } PCI(c) \bmod 30 = PCI(c') \bmod 30 , \\ \alpha_{bs} & \text{en otro caso ,} \end{cases} \quad (2.31)$$

donde  $\alpha_{bs}$  es el factor de ortogonalidad entre diferentes secuencias base, y  $\alpha_{cs-cdm_{inter}}$  es el factor de ortogonalidad entre versiones de la misma secuencia base con diferente precodificación (es decir, desplazamiento cíclico y código de multiplexación). En esta parte del estudio, se asume una red no sincronizada temporalmente, lo que conlleva que la precodificación sea solo efectiva para celdas situadas en el mismo emplazamiento, ya que solo éstas tienen su trama radio alineada en tiempo. Así,

$$\alpha_{cs-cdm_{inter}}(c, c') = \begin{cases} \frac{1}{N_{usmax}} \cdot \alpha_{cs-cdm_{intra}} & \text{si } c \text{ y } c' \\ & \text{comparten emplazamiento,} \\ 1 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2.32)$$

Es importante resaltar que, para celdas situadas en el mismo emplazamiento, el producto  $E[n_{us}(c')] \cdot \frac{1}{N_{usmax}}$  es el ratio de utilización de código medio en la celda interferente  $c'$ . Cuanto menor sea este ratio, menor será la interferencia media entre

celdas generada por la celda  $c'$  en una celda situada en el mismo emplazamiento. Tal protección no existe entre celdas que no están en el mismo emplazamiento.

Caso 2: Salto de grupo de secuencias habilitado

Cuando el salto de grupo de secuencias está habilitado, las colisiones entre secuencias base solo ocurren entre celdas que tengan diferentes listas de salto de las secuencias, con una frecuencia de 1 de cada 30 ranuras temporales (slots). Así,

$$X_{inter}(c, c') = \begin{cases} \alpha_{bs} & \text{si } \left\lfloor \frac{PCI(c)}{30} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{PCI(c')}{30} \right\rfloor, \\ \frac{29\alpha_{bs}+1}{30} & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2.33)$$

En la expresión anterior, se asume que las celdas situadas en el mismo emplazamiento siempre comparten la misma lista de salto de secuencias base, de tal forma que la precodificación no es efectiva entre celdas diferentes.

Idealmente, las secuencias base diferentes son completamente ortogonales, y lo mismo ocurre para versiones precodificadas de la misma secuencia base (es decir,  $\alpha_{bs} = \alpha_{cs-cdm_{inter}} = 0$ ). En la práctica, existe cierta correlación entre las secuencias base (es decir,  $\alpha_{bs}, \alpha_{cs-cdm_{inter}} \in (0, 1]$ ) [60] [61].

#### 2.4.2.2. Probabilidad de fallo en el canal PUCCH

La probabilidad de fallo en el PUCCH se define como la probabilidad de que la relación SINR media en dos slots en este canal esté por debajo de un cierto umbral. La SINR media (en dBs) para un usuario  $u$  se estima simplemente restando la señal deseada y los niveles de interferencia recibida medios (en unidades logarítmicas) como:

$$\begin{aligned} SINR(u) &= P_{rx}(u) - (\overline{I(S(u))} + N_0) \\ &= P_{rx}(u) - (I_{intra}(S(u)) + \sum_{c' \neq S(u)} I_{inter}(S(u), c') + N_0), \end{aligned} \quad (2.34)$$

donde  $SINR(u)$  es la SINR media del PUCCH del usuario  $u$ ,  $P_{rx}(u)$  es el nivel medio de señal deseada en la estación base, fijado por el esquema de control de potencia, y  $\overline{I(S(u))}$  es el nivel medio de interferencia en el PUCCH en la celda servidora del usuario  $u$ ,  $S(u)$ . Nótese que, por la geometría del enlace ascendente,

$P_{rx}(u)$  es distinto para cada usuario, mientras que  $\overline{I(S(u))}$  es el mismo para todos los usuarios que se encuentren en la misma región del PUCCH de una celda.

Para calcular los niveles de interferencia, la potencia transmitida por cada usuario del PUCCH,  $P_{tx}(u)$ , se obtiene a partir del control de potencia del enlace ascendente con la ecuación (ULPC) [62]:

$$P_{tx}(u) = \text{mín} \{ P_{tx\text{máx}}(u), P_{0PUCCH} + \alpha \cdot L_p(c', u) + \delta_{mcs} + f(\Delta_i) \} , \quad (2.35)$$

donde  $P_{tx\text{máx}}$  es la potencia máxima transmitida por el terminal,  $P_{0PUCCH}$  es el parámetro de potencia nominal en PUCCH (es decir, el nivel de potencia objetivo recibida por PRB en la estación base),  $L_p(c', u)$  son las pérdidas de propagación del usuario  $u$  a la celda  $c'$ ,  $\alpha$  es el factor de compensación de pérdidas,  $\delta_{mcs}$  es un offset dependiente del MCS asignado y  $f(\Delta_i)$  es un factor de corrección en bucle cerrado. En la fórmula, se asume que se asigna un único PRB al usuario del PUCCH.

En este estudio, se consideran dos modos de funcionamiento del control de potencia, como son el control de potencia en lazo abierto y el control rápido de potencia en lazo cerrado. Mientras que el primero sólo funciona en el inicio de la conexión, el segundo entra en funcionamiento durante el resto de la conexión. Para el caso de lazo abierto,  $f(\Delta_i) = 0$ , mientras que, para el caso de bucle cerrado, el usuario ajusta la potencia transmitida en el enlace ascendente de acuerdo a los valores de corrección enviados por la estación base. En este caso, el receptor en el eNB estima la SINR experimentada en el enlace ascendente, comparándola con la señal deseada objetivo. Si la SINR recibida es inferior (superior) a un umbral, se envía un comando al usuario para incrementar (decrementar) la potencia de transmisión.

Una vez que los valores de SINR del PUCCH se han calculado para cada usuario, la probabilidad de fallo del PUCCH en una celda se estima como el ratio de usuarios que no satisfacen el umbral mínimo,  $SINR_{th}$ , de forma que

$$P_{fallo}(c) = p(SINR(u) \leq SINR_{th} | S(u) = c) \quad . \quad (2.36)$$

En este trabajo, se asume que  $SINR_{th} = -4.4$  para los formatos de trama 1/1a/1b y  $-4.2$  dB para los formatos de trama 2/2a/2b [63].

### 2.4.3. Análisis de rendimiento

El modelo descrito se incluye en un simulador de nivel de sistema para evaluar el rendimiento del PUCCH con distintos planes de PCI. A diferencia del estudio del PDSCH, en este caso se opta por un simulador estático de nivel de sistema, similar al que suele integrarse en las herramientas de planificación comerciales. Esta decisión se debe a que será necesario simular escenarios grandes para poder observar problemas de colisión entre señales de referencia, lo que conllevaría simulaciones muy largas y computacionalmente costosas en el caso del simulador dinámico. El simulador estático implementa un escenario realista, construido a partir de datos de una red real. Los detalles de la herramienta de simulación pueden consultarse en el apéndice B. Por claridad, en este apartado se explica primero la metodología experimental y después se presentan los resultados.

#### 2.4.3.1. Metodología experimental

La Fig. 2.24 muestra el escenario real simulado, que consiste en 699 estaciones base que cubren un área geográfica de aproximadamente 2900 km<sup>2</sup>. En la figura, se

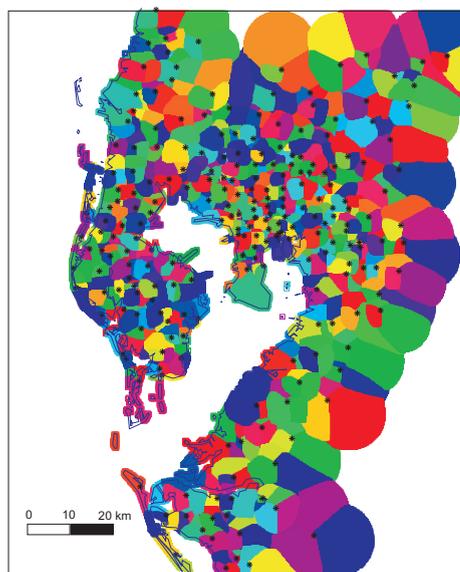


FIGURA 2.24: Escenario de simulación.

TABLA 2.10: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Tipo de simulador	Estático, nivel de sistema (basado en rejilla de ubicaciones)
Modelo de tráfico del PUCCH	Llegadas de Poisson Tiempo de servicio fijo 1 ms Distribución espacial de usuarios uniforme / no uniforme
Modelo de propagación	COST-231 Okumura Hata Desvanecimiento lento (8 dB std., distancia de correlación 20 m)
Modelo de antena	Configuración SIMO (1x2) Formatos de trama PUCCH 1/1a/1b, 2/2a/2b
Modelo de terminal (UE)	Potencia de transmisión 23 dBm Ganancia de antena 0 dB Altura de antena 1.5 m
Modelo de estación base (eNB)	Altura de antena 30 m Ganancia max. antena 17 dB Suelo de ruido -119.7 dBm/PRB
Modelo de RRM	Control de potencia en lazo abierto / lazo cerrado $P_{0,PUCCH} = -120$ dBm
Modelo de interferencia	Factores de ortogonalidad $\in [0, 1]$

representan con colores las diferentes áreas de servicio de celda, que se han acotado mediante las líneas de costa para mejorar la precisión de las estimas. Como se deduce de la figura, el área incluye una mezcla de diferentes entornos, con zonas densamente pobladas y zonas rurales, y con una distancia entre emplazamientos que varía entre 1.5 a 14 km. El gran tamaño del área considerada, con muchas más celdas que códigos DM RS, permite reflejar adecuadamente la problemática de planificar los PCIs en el PUCCH.

El escenario anterior se implementa en un simulador estático de nivel de sistema. La Tabla 2.10 muestra los parámetros más importantes de la herramienta de simulación. Para un conocimiento más amplio de estos parámetros, puede consultarse el apéndice B.

Como en la mayoría de herramientas de planificación, el escenario se divide en una rejilla de puntos que representan localizaciones de usuarios potenciales. Para dichas ubicaciones, se calculan las pérdidas de propagación de cada una de las estaciones base con el modelo COST-231 Hata [64]. Además, se considera un desvanecimiento lento mediante la distribución clásica log-normal. Con las pérdidas y la potencia transmitida de cada estación base, se estiman las áreas de servicio de las celdas.

La demanda de tráfico se modela según un patrón de llegada de Poisson, cuya tasa de llegadas,  $\lambda$ , se distribuye de manera uniforme o no uniforme a lo largo de las celdas del escenario. En cada celda, los intentos de conexión del PUCCH se

distribuyen uniformemente entre las localizaciones de usuarios que forman el área de servicio.

Como suele ser habitual, se asume que el operador ha configurado  $\Delta_{shift} = 2$ . Así, el número máximo de usuarios por cada región del PUCCH es 18 o 6 para los formatos de trama tipo 1/1a/1b y 2/2a/2b, respectivamente. La potencia de transmisión de cada ubicación de usuario se estima según el esquema de control de potencia considerado (control de lazo abierto o lazo cerrado) a partir de (2.35). En dicha fórmula, el parámetro de potencia nominal  $P_{0,PUCCH}$  se fija a -120 dBm, siguiendo la práctica común. Este valor tan bajo contrasta con los valores mucho más altos configurados para el canal compartido de datos de usuario del enlace ascendente (PUSCH). En este sentido, conviene recordar que, mientras que en el PUSCH se obtienen tasas de transmisión mayores siempre que se mejore la calidad de señal, en el PUCCH, al ser un canal de señalización, basta con asegurar una calidad de señal mínima, no obteniéndose beneficio alguno a partir de un punto por mejorar la calidad de señal. Además, configurando un valor bajo de  $P_{0,PUCCH}$ , se asegura que los usuarios consiguen el objetivo de potencia recibida en la estación base, reduciendo el número de usuarios limitados en potencia, y mejorando así la robustez del PUCCH. A esto ayuda el que el número de PRBs asignados a un usuario del PUCCH es reducido, a diferencia de lo que ocurre en el PUSCH, donde pueden llegar a asignarse todos los PRBs del sistema [65].

Los niveles de potencia de señal recibida se calculan según los datos de propagación. Una vez calculados los niveles de interferencia con (2.21)-(2.33), los ratios de SINR y la probabilidad de fallo en el PUCCH se calculan a nivel de usuario con (2.34)-(2.36).

Se plantea un análisis multifactorial con 8 casos de uso (asunciones del modelo y formatos de trama) y 8 estrategias de planificación (4 planes de asignación con versiones con/sin salto de secuencia de grupo).

Se definen cuatro casos de uso principales con el propósito de evaluar el impacto de las diferentes suposiciones del modelo.

1. Caso 1 (Caso ideal): Control de potencia en lazo cerrado, ortogonalidad perfecta (es decir,  $\alpha_{bs} = \alpha_{cs-cdm_{intra}} = 0$ ,  $\alpha_{cs-cdm_{inter}} = 0$  para celdas del mismo emplazamiento y 1 en otro caso), y distribución espacial de usuarios uniforme.

2. Caso 2 (Control de potencia no ideal): Similar al caso 1, pero con control de potencia en lazo abierto.
3. Caso 3 (Ortogonalidad parcial): Control de potencia en lazo cerrado, ortogonalidad real ( $\alpha_{bs} = 0.3$  [60],  $\alpha_{cs-cdm_{intra}} = 0.2$  [61],  $\alpha_{cs-cdm_{inter}} = \frac{0.2}{N_{usmax}}$  para celdas del mismo emplazamiento y 1 para celdas de distinto emplazamiento), y distribución espacial de usuarios uniforme.
4. Caso 4 (Distribución de tráfico irregular): Similar al caso 3, con ortogonalidad parcial, pero con una distribución espacial de usuarios realista. En este caso, la demanda de tráfico total del PUCCH en la red se distribuye por celda a partir de las estadísticas de intento de acceso al PUCCH desglosadas por celda, tomadas de datos de la red real.

En cada uno de esos 4 casos de uso, se evalúan los dos formatos de trama descritos (tipo 1/1a/1b y tipo 2/2a/2b) para diferentes valores de intensidad de tráfico. En el caso uniforme, la intensidad de tráfico se controla ajustando la tasa de llegada al PUCCH mediante el parámetro  $\bar{n}_r$ , es decir, el número medio de peticiones por cada región del PUCCH e intervalo de tiempo temporal (TTI). Para el caso de distribución no uniforme, esta intensidad de tráfico se calcula a nivel de celda. Para ello se utiliza la tasa global de llegada del PUCCH en la red distribuyendo el número de intentos por celda. Este número de intentos por celda se obtiene a partir de las estadísticas de la red real.

En todos los casos de uso, se prueban 4 métodos de planificación de PCI (con sus variantes), que son:

1. Plan de PCI enfocado al enlace ascendente (ULP): Este plan de PCI trata de asignar secuencias base DM RS diferentes a celdas vecinas, de forma que se minimice la interferencia en el PUCCH debida a las colisiones de DM RS. Con este propósito, el grafo de red se parte en 30 subdominios evitando que celdas vecinas tengan valores iguales de  $PCI(c) \bmod 30$ . Así, este plan ULP consigue el mejor rendimiento en el PUCCH, a costa de deteriorar el rendimiento en el enlace descendente, al no considerar los problemas de colisión, confusión o las colisiones de las señales de referencia del enlace descendente.
2. Plan de PCI enfocado al enlace descendente (DLP): En este plan, los PCIs se asignan basándose únicamente en consideraciones del enlace descendente,

evitando problemas de colisión y confusión y colisiones de las señales de referencia DL CRS. Al no considerar el rendimiento en el canal ascendente, podrían ocurrir colisiones en las señales de referencia del canal ascendente (DM RS) en el PUCCH, y por lo tanto, el rendimiento de este canal puede ser peor que considerando el plan ULP.

3. Plan de PCI aleatorio (RP): En este plan, usado únicamente como referencia de comparación, los valores de PCI se asignan de manera aleatoria a las celdas. Para filtrar soluciones que no tienen ningún sentido, se generan 100 planes aleatorios de PCI, y se selecciona aquél que ofrece el menor número de problemas de colisión y confusión, ya que éste es el criterio que utilizan los operadores a la hora de construir sus planes de PCI.
4. Caso peor (ULWP): En este plan, todas las celdas vecinas tienen la misma secuencia base DM RS, y, por lo tanto, todas colisionan en el PUCCH. Este caso se utiliza para acotar el peor rendimiento del PUCCH.

Los planes ULP y DLP se construyen resolviendo un problema de coloración de grafos adaptado para la planificación de PCI mediante algoritmos de partición de grafos multinivel y evolutivos [66]. Estos algoritmos de solución se describen de manera detallada en la siguiente sección. Como se explica más adelante, en estos algoritmos, se construye un grafo de red, donde los vértices y aristas representan las celdas y las relaciones de adyacencia de la red. Los pesos de las aristas reflejan los costes asociados a tener dos celdas vecinas con el mismo valor de PCI, CRS o DM RS, tal que:

$$\gamma_{ij} = \omega_{PCI} * \gamma_{ij}^{PCI} + \omega_{DL CRS} * \gamma_{ij}^{DL CRS} + \omega_{UL DM RS} * \gamma_{ij}^{UL DM RS} , \quad (2.37)$$

donde  $\omega_{PCI}$ ,  $\omega_{DL CRS}$  y  $\omega_{UL DM RS}$  son variables que permiten configurar el método de partición según el plan seleccionado. Para el plan ULP,  $\omega_{PCI} = \omega_{DL CRS} = 0$  y  $\omega_{UL DM RS} = 1$  (es decir, solo se consideran las colisiones de DM RS). Para el plan DLP,  $\omega_{UL DM RS} = 0$  y  $\omega_{PCI} = \omega_{DL CRS} = 1$  (es decir, solo se consideran los problemas de colisión-confusión y las colisiones de DL CRS). Una vez construido el grafo de red, se busca la partición del grafo en un número fijo de subdominios  $k$ , de forma que se maximice el corte de arista. Específicamente,  $k = 30$  para ULP (posibles valores de DM RS) y, para DLP, se realizan dos particiones consecutivas, una primero de  $k = 3$  para evitar valores iguales de  $PCI(c)$  módulo 3 (es decir,

colisiones de DL CRS) entre vecinas y otra después de  $k = 168$  grupos para evitar problemas de colisión y confusión, cuya combinación es el plan final de PCI.

Para cada uno de los 4 planes descritos, se simulan dos variantes, considerando que el salto de secuencias de grupo está activo o inactivo. Así, se simula un total de  $4 \cdot 2 = 8$  planes de PCI diferentes para cada caso de uso.

La evaluación de los métodos se basa principalmente en la probabilidad de fallo del PUCCH, calculada como la media de la probabilidad de fallo a lo largo de las celdas del escenario. En cada celda, dicha probabilidad se calcula como el porcentaje de puntos que garantizan una SINR media mínima en el PUCCH,  $SINR_{th}$ . Como se comentó anteriormente, se asume que  $SINR_{th} = -4.4$  para los formatos de trama 1/1a/1b y  $-4.2$  dB para los formatos de trama 2/2a/2b [63]. Siguiendo las recomendaciones del operador, se considera inaceptable cualquier valor de probabilidad de fallo del PUCCH superior al 1 %.

#### 2.4.3.2. Análisis de resultados

Por brevedad, se presentan de manera completa los resultados obtenidos para el formato de trama 1/1a/1b, mientras que solo se presentan algunos casos del formato de trama 2/2a/2b.

##### a) Formato de trama 1/1a/1b

El análisis se enfoca primero en los resultados con condiciones ideales, y posteriormente se evalúa el impacto de incluir condiciones realistas en el modelo de sistema.

*Caso 1: Caso ideal (Ortogonalidad total, control de potencia en lazo cerrado y tráfico uniforme).*

La Fig. 2.25 muestra el rendimiento de los 4 planes de asignación de PCI (ULP, DLP, RP y ULWP) con y sin salto de secuencias de grupo (*hopping*) para distintos niveles de tráfico. Las líneas continuas corresponden a los métodos con salto activo, mientras que las líneas discontinuas representan los casos con el salto desactivado. El eje  $x$  representa la intensidad de tráfico en términos de número medio de usuarios demandantes de servicio por cada región del PUCCH,  $\bar{n}_r$ , donde

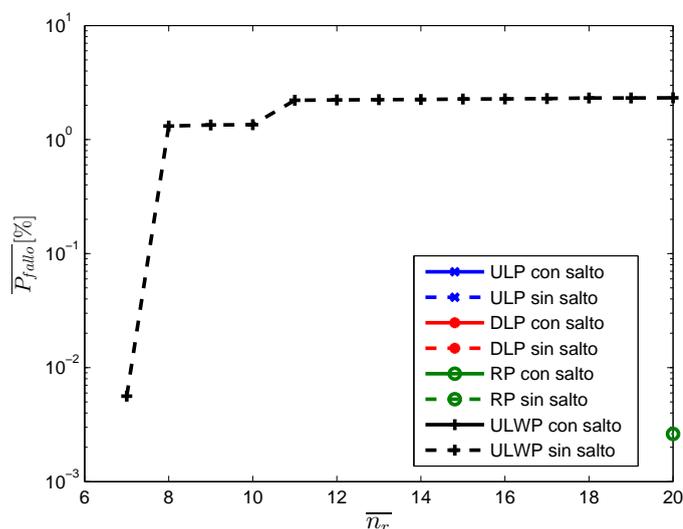


FIGURA 2.25: Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b en el caso ideal.

cabe recordar que la capacidad máxima del PUCCH con el formato 1/1a/1b, y  $\Delta_{shift} = 2$ , es de 18 usuarios por región (= 6 desplazamientos cíclicos \* 3 códigos de ensanchamiento). El eje  $y$  representa la probabilidad media de fallo en el canal PUCCH de todas las celdas del escenario,  $\overline{P_{fallo}}$ .

Como se espera, se observa que el peor rendimiento se obtiene con el esquema ULWP sin salto de secuencias, donde las secuencias DM RS son las mismas para todas las celdas. Este método es el único con valores de probabilidad de fallo no despreciables, de hasta 2.4% en este escenario con tráfico uniforme por celda. Con el resto de métodos, la probabilidad de fallo del PUCCH es nula, y, por eso, no aparecen en la figura. Este resultado se debe a que ninguna ubicación del escenario experimenta una SINR media del PUCCH por debajo del umbral, sea cual sea la demanda de tráfico del sistema. Únicamente en el esquema RP sin salto de frecuencia con intensidad de tráfico extrema, aparece alguna ubicación aislada en la que no se garantiza la mínima calidad de conexión en el PUCCH. Por ello, no existe diferencia en el PUCCH entre elegir un plan de PCI aleatoriamente, uno basado en criterios del enlace descendente o uno basado en el enlace ascendente. De este resultado, se puede concluir que, en el caso ideal, para el formato 1/1a/1b, las secuencias de grupo y los saltos de desplazamiento cíclicos consiguen evitar fallos de PUCCH sin necesidad de utilizar una estrategia de planificación del PCI específicamente orientada al enlace ascendente.

*Caso 2: Control de potencia no ideal.*

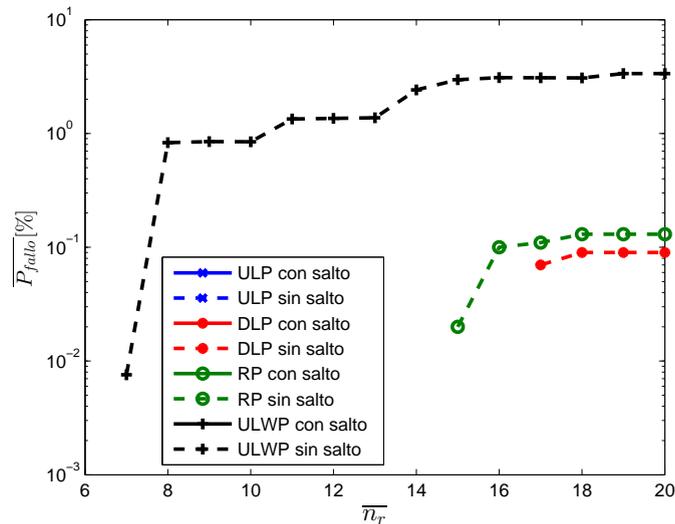


FIGURA 2.26: Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con control de potencia en lazo abierto.

La Fig. 2.26 muestra los resultados de distintos esquemas de planificación de PCI con control de potencia en lazo abierto. En la figura, se observa que todos los esquemas con salto de secuencia aún presentan valores nulos para la probabilidad de fallo en el PUCCH con control de potencia en lazo abierto. Sin embargo, el rendimiento de los esquemas sin salto se degrada con intensidades de tráfico altas con el control de potencia en lazo abierto. Así, la probabilidad de fallo con control de potencia en lazo abierto puede llegar hasta un 3.36 % para un esquema ULWP, 0.09 % para DLP y 0.13 % para RP, si se desactiva el salto de secuencias. El método ULP es el único método que logra probabilidad de fallo nula con valores altos de tráfico sin salto. Así pues, sólo se garantiza un rendimiento adecuado del PUCCH con tráfico alto si se evitan explícitamente las colisiones de DM RS en el enlace ascendente.

### Caso 3: Ortogonalidad parcial entre secuencias.

La Fig. 2.27 presenta los resultados de un esquema de planificación de PCI si se tiene en cuenta una ortogonalidad no perfecta entre diferentes desplazamientos cíclicos y secuencias base. De la comparación con las figuras anteriores, se puede deducir que la falta de ortogonalidad tiene un impacto muy negativo en el rendimiento del PUCCH. Este impacto limita el número máximo de usuarios que pueden transmitir en una región PUCCH al mismo tiempo. De hecho, para una probabilidad máxima de fallo del 1 %, el número máximo de usuarios simultáneos por región PUCCH es 9 para todos los esquemas de planificación con salto de

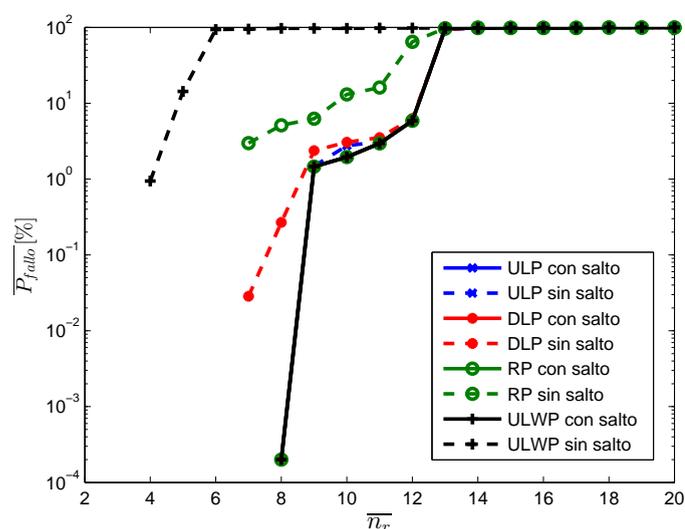


FIGURA 2.27: Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con ortogonalidad parcial.

secuencia (ULP, DLP, RP y ULWP). Más importante, cuando se desactiva el salto de secuencia, sólo el método que cuida las colisiones en el enlace ascendente (ULP) consigue mantener esa capacidad. Concretamente, la capacidad decrece sin salto de secuencia hasta 4 usuarios para ULWP, 6 para RP, 8 para DLP y 9 para ULP.

#### Caso 4: Demanda de tráfico no uniforme.

La Fig. 2.28 muestra los resultados para los esquemas de planificación de PCI con la distribución de tráfico no uniforme tomada de la red real. Cuando se compara con el caso uniforme, se observa que la distribución de tráfico no uniforme conlleva un incremento en la probabilidad de fallo del PUCCH en la mayoría de los esquemas.

#### b) Formato de trama 2/2a/2b

El análisis para este formato se restringe al caso 4 (distribución de tráfico no uniforme con ortogonalidad parcial), por ser el caso más realista. Es importante recordar que la capacidad máxima para el formato 2/2a/2b con la configuración considerada ( $\Delta_{shift} = 2$ ) es de 6 usuarios. La Fig. 2.29 muestra que, en estos formatos, solo los esquemas ULW y RP sin salto de secuencia muestran un rendimiento del PUCCH inaceptable y para intensidades de tráfico cercanas a la capacidad máxima del sistema.

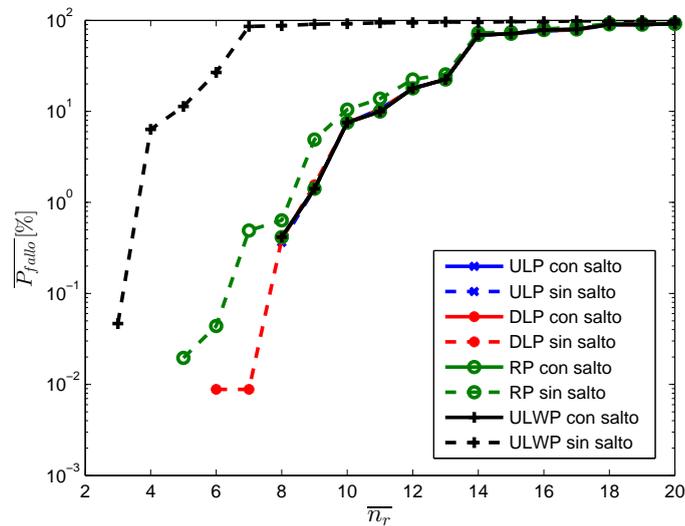


FIGURA 2.28: Rendimiento del PUCCH para formato de trama 1/1a/1b con distribución de tráfico no uniforme.

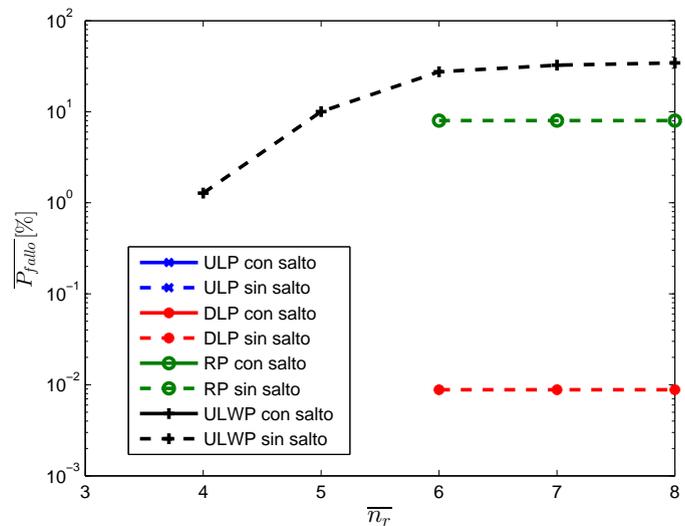


FIGURA 2.29: Rendimiento del PUCCH con distribución de tráfico no uniforme para formato de trama 2/2a/2b.

### 2.4.4. Conclusiones

En este estudio, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del impacto de la planificación de PCI en el canal común de control del enlace ascendente (PUCCH). Con este propósito, se ha presentado un nuevo modelo analítico que refleja la influencia del plan de PCI en la interferencia y la probabilidad de fallo debida a las colisiones de las señales de referencia de demodulación (DM RS). Este modelo se ha integrado en un simulador estático de nivel de sistema, donde se evalúa el

rendimiento de diferentes esquemas de planes de PCI con distintos formatos de trama PUCCH y diferentes condiciones de red.

Los resultados de la simulación en un escenario real muestran que el plan de PCI tiene un impacto significativo en la probabilidad de fallo del PUCCH cuando el salto de secuencias base se inhabilita, situación que es habitual en las redes actuales debido a la complejidad que requiere la implementación del mismo. En dicho impacto, el factor más crítico a tener en cuenta es la falta de ortogonalidad que existe entre las DM RS debido al diseño no perfecto de las secuencias y al entorno de propagación multicamino. Así, un plan inadecuado de PCI puede reducir considerablemente el número máximo de usuarios simultáneos que pueden transmitir en el PUCCH, especialmente cuando se utiliza el control de potencia en lazo abierto.

También se ha mostrado que un plan de PCI diseñado únicamente considerando los problemas de colisión-confusión de PCI y las colisiones de las señales de referencia en el enlace descendente consigue un rendimiento próximo (pero inferior) al caso ideal en cuanto a colisiones de DM RS en el PUCCH. Sin embargo, en casos extremos, las colisiones de DM RS causadas por celdas adyacentes que compartan la misma secuencia pueden degradar significativamente el rendimiento del PUCCH. Esto es especialmente cierto en áreas con alta población de usuarios, con distancia entre emplazamientos pequeña, si la protección entre códigos no es efectiva.

Es importante resaltar que esta pérdida de rendimiento en el PUCCH puede ser crítica, ya que está directamente ligada al rendimiento del enlace descendente. Si el canal de control deja de funcionar adecuadamente, se dejarán de reportar las medidas de CQI en el caso de que el usuario no esté transmitiendo datos a través del canal PUSCH.

## 2.5. Algoritmos de planificación de PCI basados en teoría de grafos

De los estudios anteriores, se puede concluir que:

- Un plan inadecuado de PCI, donde las celdas estrechamente relacionadas colisionan en sus CRS, puede llevar a una estimación inadecuada de la calidad del canal, y, como consecuencia, a una tasa de transmisión en el enlace descendente menor del máximo posible. Así, un plan de PCI debe evitar valores de  $PCI$  módulo 6 (o  $PCI$  módulo 3, dependiendo de la configuración de antena) en celdas con altos niveles de interferencia mutua entre celdas, y,
- un plan inadecuado de PCI, donde las celdas estrechamente relacionadas comparten el mismo valor de DM RS en el PUCCH, puede llevar a fallos en este canal, que degradan la tasa de transmisión del enlace descendente, y pueden conllevar alto retardo por retransmisiones, debido a un mecanismo de reporte inadecuado. Así, un plan adecuado de PCI debe evitar valores iguales de  $PCI$  módulo 30 para eliminar colisiones de DM RS en el PUCCH en celdas cercanas con altos niveles de interferencia mutua.

Ambas consideraciones deben tenerse en cuenta, además de los problemas de colisión y confusión, cuando se construye un plan de PCI. En esta sección, se reformula primero el problema de la asignación de PCIs como un problema de partición de grafos que integra todos esos objetivos. Después se describe cómo se adaptan diversos algoritmos clásicos de partición de grafos para la planificación de PCIs.

### 2.5.1. Reformulación de la asignación de PCIs como problema de partición de grafos

La siguiente formulación para la planificación de PCI busca evitar los problemas de colisión y confusión, las colisiones de las señales de referencia del enlace descendente y las colisiones de las señales de referencia del enlace ascendente. Con este propósito, el problema de planificación de PCI se formula como un problema de optimización multiobjetivo.

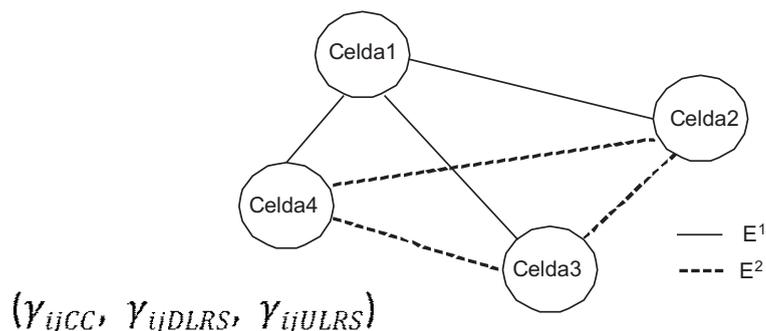


FIGURA 2.30: Estructura del grafo de red.

Primero, la red se modela como un grafo,  $G = (V, E)$ . Los vértices del grafo,  $V$ , representan las celdas en el área de red analizada. Por su parte, el conjunto completo de aristas,  $E$ , es la unión de dos subconjuntos de aristas,  $E^1$  y  $E^2$ . Las aristas en  $E^1$  unen cada celda con sus vecinas, para modelar problemas de colisión de PCI y colisiones de CRS y DM RS entre celdas adyacentes, mientras que las aristas en  $E^2$  unen vecinas de la misma celda, para modelar los problemas de confusión de PCI. En ambos casos, las celdas vecinas se definen como aquellas celdas desde o hacia las que se producen traspasos.

La Fig. 2.30 muestra un ejemplo de cómo se construye el grafo para una red formada por una celda (celda 1) y sus tres vecinas (celdas 2, 3 y 4). El grafo consta de 4 vértices (1 por celda) y 6 aristas, agrupadas en 2 grupos de aristas,  $E^1$  y  $E^2$ , de 3 aristas cada uno. La celda 1 (la celda principal en el ejemplo) se une a la celda 2, 3 y 4 mediante las aristas de  $E^1$ , mientras que estas últimas se unen entre sí a través de las aristas de  $E^2$ .

Como se muestra en la Fig. 2.30, el peso de cada arista es una tripleta, formada por un peso para los problemas de colisión y confusión,  $\gamma_{ijCC}$ , un peso para las colisiones de CRS en el enlace descendente,  $\gamma_{ijDLRS}$ , y un peso para las colisiones de DM RS en el enlace ascendente,  $\gamma_{ijULRS}$ . Estos pesos representan la penalización asociada a cada uno de los problemas que aparecen cuando no se asigna correctamente el PCI entre celdas adyacentes.

El primer peso,  $\gamma_{ijCC}$ , se calcula como

$$\gamma_{ijCC} = \gamma_{ijCol} + \gamma_{ijCon}, \quad (2.38)$$

donde

$$\gamma_{ijCol} = \begin{cases} ColW & \text{si } i, j \in E^1, \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\gamma_{ijCon} = \begin{cases} ConfW & \text{si } i, j \in E^2, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2.40)$$

En (2.39) y (2.40), la penalización para los problemas de colisión y confusión viene dada por los factores de prioridad  $ColW$  y  $ConfW$ , definidos por el operador para priorizar entre los diferentes objetivos.

El peso asociado a las colisiones de DL RS,  $\gamma_{ijDLRS}$ , se calcula como

$$\gamma_{ijDLRS} = \begin{cases} DLRSW \frac{HO_{ij}}{\sum_{i,j} HO_{ij}} \left(1 - \frac{LDL_i + LDL_j}{2}\right) & \text{si } (i, j) \in E^1, \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (2.41)$$

es decir, como el producto del peso de prioridad para las colisiones de DL CRS,  $DLRSW$ , la importancia relativa de la adyacencia  $(i, j)$  frente a otras adyacencias de la red, calculada como el número de traspasos entre  $i$  y  $j$  dividido por el número total de traspasos entre cualquiera de las celdas de la red,  $\frac{HO_{ij}}{\sum_{i,j} HO_{ij}}$ , y el ratio medio de PRBs sin usar en la adyacencia,  $\left(1 - \frac{LDL_i + LDL_j}{2}\right)$ , donde  $LDL_i$  y  $LDL_j$  son los ratios de utilización de PRB del enlace descendente de las celdas  $i$  y  $j$ . El factor de traspasos normalizado se usa como medida de interferencia potencial entre celdas vecinas, debida principalmente a la proximidad geográfica de las dos celdas. Por simplicidad, se asume que dos celdas están generalmente más cerca cuantos más traspasos existen entre ellas. Así, cuanto mayor sea el valor de  $\frac{HO_{ij}}{\sum_{i,j} HO_{ij}}$ , mayor será  $\gamma_{ijDLRS}$ , reflejando que los problemas de colisión de CRS son más severos cuando dos celdas están más cerca debido a un mayor nivel de interferencia potencial. De igual forma, el factor de utilización intenta reflejar que el beneficio de evitar colisiones de CRS es mayor para redes poco cargadas. Así, si  $LDL_i = LDL_j = 1$ , no tiene sentido considerar las colisiones de CRS en la adyacencia (arista)  $(i, j)$  cuando se construye un plan de PCI. Así,  $\gamma_{ijDLRS} = 0$  si  $LDL_i = LDL_j = 1$ .

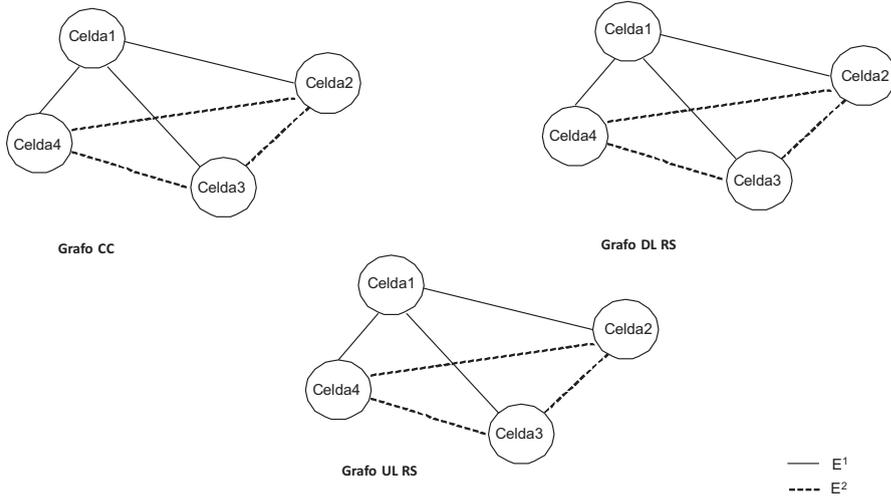


FIGURA 2.31: Separación en un único grafo por problema.

Finalmente, el peso asociado a las colisiones de DM RS en el enlace ascendente,  $\gamma_{ijULRS}$ , se calcula como

$$\gamma_{ijULRS} = \begin{cases} ULRSW \frac{HO_{ij}}{\sum_{i,j} HO_{ij}} \left( \frac{LUL_i + LUL_j}{2} \right) & \text{si } (i, j) \in E^1 \text{ y } f_{gh} \text{ está deshabilitado,} \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (2.42)$$

es decir, como el producto del peso de prioridad  $ULRSW$ , el número normalizado de traspasos entre celdas vecinas  $i$  y  $j$ ,  $\frac{HO_{ij}}{\sum_{i,j} HO_{ij}}$ , y el ratio medio de uso de PRBs en el enlace ascendente de la adyacencia,  $\left( \frac{LUL_i + LUL_j}{2} \right)$ . De igual manera, el factor de traspasos se usa como medida de interferencia potencial (y, consecuentemente, problemas de calidad de señal) basados en la proximidad de las celdas. Sin embargo, en este caso, el factor de utilización refleja que el nivel de interferencia es mayor para celdas más cargadas. Por lo tanto,  $\gamma_{ijULRS} = 0$  si  $LUL_i = LUL_j = 0$ , mientras el valor mayor de  $\gamma_{ijULRS}$  se obtiene para el máximo valor de utilización de PRB en el enlace ascendente (es decir,  $LUL_i = LUL_j = 1$ ).

Por conveniencia, el grafo con 3 pesos por arista ( $\gamma_{ijCC}$ ,  $\gamma_{ijDLRS}$ ,  $\gamma_{ijULRS}$ ), mostrado en la Fig. 2.30, se divide en 3 grafos independientes, con el mismo conjunto de vértices  $V$  y aristas  $E$ , pero distintos pesos de arista,  $\gamma_{ijCC}$ ,  $\gamma_{ijDLRS}$ , y  $\gamma_{ijULRS}$ , como se muestra en la Fig. 2.31. Estos grafos se denominan de aquí en adelante como grafos CC, DLRS y ULRS.

La partición de los tres grafos llevada a cabo asignando los vértices a un número limitado de subdominios refleja la asignación de celdas a PCIs, patrones de DL CRS y grupos de secuencias base DM RS. Específicamente, la partición del grafo CC en 504 subdominios refleja la asignación de celdas a PCIs, la partición del grafo DLRS a 3 (ó 6) subdominios refleja la asignación de celdas a patrones de CRS en el enlace descendente, y la partición del grafo ULRS a 30 subdominios refleja la asignación de celdas a grupos de secuencias base DM RS en el enlace ascendente. Es importante destacar que las tres particiones no son independientes, sino que están interrelacionadas, ya que el valor de los patrones de CRS y los valores de secuencia bases DM RS en una celda dependen del valor de PCI. En particular, cualquier partición del primer grafo puede representarse como un vector  $\Pi_{CC} = [p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_{N_c}]$ , donde  $p_i$  es el PCI asignado a la celda  $i$  y  $N_c$  es el número de celdas en el escenario planificado. De igual forma, cualquier partición del grafo DLRS puede expresarse como un vector  $\Pi_{DLRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, N)$ , con  $N = 3$  (ó 6) dependiendo de la configuración de antena, y cualquier partición del grafo ULRS puede expresarse como otro vector  $\Pi_{ULRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, 30)$ .

Así, un plan adecuado de PCI debe traducirse en una partición de estos tres grafos que minimice la función objetivo:

$$F(\Pi_{CC}) = \begin{cases} F_1(\Pi_{CC}) & \text{si el eNB tiene 2 o más antenas transmisoras,} \\ F_2(\Pi_{CC}) & \text{si el eNB tiene 1 sola antena transmisora,} \end{cases} \quad (2.43)$$

donde

$$F_1(\Pi_{CC}) = \sum_{\substack{(i,j) \in E \\ \Pi_{CC}(i) = \Pi_{CC}(j)}} \gamma_{ijCC} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \text{mod}(\Pi_{CC}(i),3) = \text{mod}(\Pi_{CC}(j),3)}} \gamma_{ijDLRS} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \text{mod}(\Pi_{CC}(i),30) = \text{mod}(\Pi_{CC}(j),30)}} \gamma_{ijULRS}, \quad (2.44)$$

$$F_2(\Pi_{CC}) = \sum_{\substack{(i,j) \in E \\ \Pi_{CC}(i) = \Pi_{CC}(j)}} \gamma_{ijCC} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \text{mod}(\Pi_{CC}(i),6) = \text{mod}(\Pi_{CC}(j),6)}} \gamma_{ijDLRS} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \text{mod}(\Pi_{CC}(i),30) = \text{mod}(\Pi_{CC}(j),30)}} \gamma_{ijULRS}, \quad (2.45)$$

(es decir, la suma total de los pesos de las aristas que unen vértices asignados al mismo subdominio en cada uno de los tres grafos). El primer sumando es el peso total de las aristas que unen vértices que comparten el mismo valor de PCI. El segundo sumando es el peso total de las aristas que unen vértices que comparten el mismo valor de *PCI* módulo 6 (o *PCI* módulo 3), representando celdas con el mismo patrón de CRS en el enlace descendente. El tercer sumando es el peso total de los pesos de las aristas que unen vértices que comparten el mismo valor de *PCI* módulo 30, representando celdas con el mismo valor de secuencia base DMRS en el enlace ascendente.

### Reformulación como un problema de partición de grafos

El problema descrito hasta aquí se puede clasificar como un problema de coloración de grafos. En dicho problema, se trata de asignar colores (subdominio) a los vértices del grafo de forma que se minimice el peso total de las aristas internas de los subdominios. La principal novedad frente a la formulación clásica es la extensión del problema de coloración como un problema de optimización multiobjetivo para considerar el compromiso entre las tres restricciones. Así, para encontrar un plan de PCI optimizado, puede adaptarse cualquier algoritmo de coloración clásico que sea capaz de manejar los tres grafos (CC, DLRS y ULRS) en paralelo.

Como novedad, en esta tesis se reformula el problema de coloración de grafos descrito como un problema de partición de grafos, para aprovechar el amplio abanico de rutinas disponibles en el dominio público (p.ej., Chaco [52], Party [67], Metis [50], Scotch [68], Jostle [51]). Esta gran variedad de entornos contrasta con la ausencia de rutinas similares para la coloración de grafos. Por ello, el problema se redefine como la partición de los tres grafos de forma que se maximice el corte de aristas total (es decir, la suma de pesos de las aristas externas, que unen vértices en diferentes subdominios en los tres grafos),

$$\sum_{(i,j) \in \delta(\Pi_{CC})} \gamma_{ijCC} + \sum_{(i,j) \in \delta(\Pi_{DLRS})} \gamma_{ijDLRS} + \sum_{(i,j) \in \delta(\Pi_{ULRS})} \gamma_{ijULRS}, \quad (2.46)$$

donde  $\delta(\Pi_{CC})$ ,  $\delta(\Pi_{DLRS})$  y  $\delta(\Pi_{ULRS})$  son el conjunto de aristas que unen vértices asignados a diferentes subdominios en los tres grafos, generados por las particiones  $\Pi_{CC}$ ,  $\Pi_{DLRS}$  y  $\Pi_{ULRS}$ .

En la versión clásica del problema de partición de grafos, el objetivo es minimizar (y no maximizar) el corte de aristas [20]. El problema de minimización puede convertirse fácilmente en un problema de maximización simplemente cambiando el signo de los pesos de las aristas en los grafos.

### 2.5.2. Algoritmos de partición de grafos

El problema de partición de grafos pertenece a la clase de problemas de decisión conocidos como  $\mathcal{NP}$ -complejos (en inglés,  $\mathcal{NP}$ -hard) [69]. Estos problemas se caracterizan por no existir un algoritmo que los resuelva en tiempo polinomial, y de ahí su dificultad. Por esta razón, en la bibliografía se han propuesto muchos algoritmos de partición de grafos heurísticos [70]. En este trabajo, se plantea por primera vez la adaptación de un algoritmo de refinamiento multinivel [71] para resolver la planificación de PCI como un problema de optimización multiobjetivo.

La Fig. 2.32 muestra la estructura de un algoritmo de refinamiento multinivel para la partición de grafos, consistente en tres etapas: engrosamiento del grafo (*coarsening*), partición inicial y desdoblamiento (*uncoarsening*) [70]. En la fase de engrosamiento, el grafo se simplifica a base de colapsar (unir) vértices (generalmente, por parejas), con la intención de formar vértices más complejos en un grafo de nivel superior. Se obtiene así una serie de grafos,  $G^0, G^1, \dots, G^m$ , como simplificación sucesiva del grafo original,  $G^0$ . El engrosamiento continúa hasta que el número de vértices en el grafo colapsado sea igual al número deseado de subdominios. En la siguiente fase, en el grafo más simple, se construye una partición inicial de alta calidad con una baja carga computacional. Con este propósito, se puede utilizar cualquier algoritmo de partición de grafos básico (es decir, no multinivel), como, por ejemplo, múltiples intentos aleatorios [72], algoritmo del viajante (*graphwalking*) [73], etc. Una vez obtenida la partición inicial en el grafo colapsado, ésta se proyecta de vuelta sobre el grafo original en la fase de desdoblamiento mediante el despliegue de vértices. Después de cada paso de desdoblamiento, se suele aplicar un algoritmo de refinamiento local (por ejemplo, voraz [54] o Fiduccia-Matheyses [74]) para mejorar la calidad de la partición. El refinamiento consiste en una serie de iteraciones donde se evalúan todos los posibles movimientos de vértices a otros posibles subdominios. Por eficiencia computacional, el refinamiento solo se realiza en los vértices que se encuentran en los bordes de los subdominios. Entre todos los movimientos, el algoritmo selecciona aquél que logra la reducción

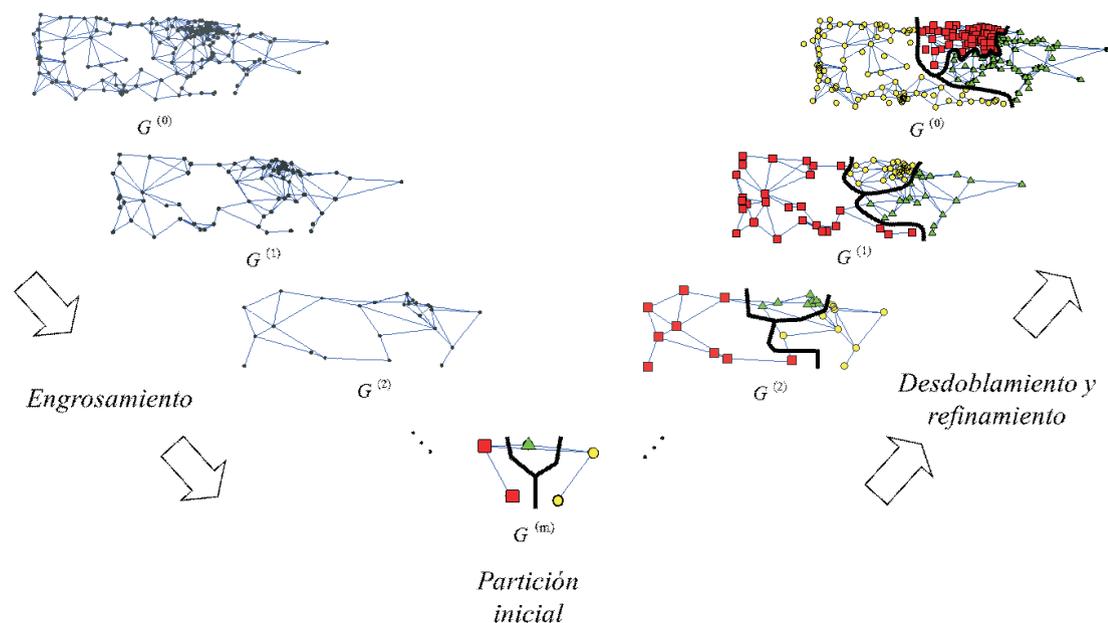


FIGURA 2.32: Algoritmo de refinamiento multinivel clásico.

mayor en el corte de aristas. La experiencia previa del grupo en el que se ha realizado esta tesis demuestra que, en los grafos de redes celulares, el refinamiento multinivel supera a otros métodos tanto en la calidad de la solución como en el tiempo de ejecución [20].

En este trabajo, se modifica un algoritmo clásico de refinamiento multinivel de partición de grafos para que funcione como un algoritmo de coloración para la planificación de PCI. En la Fig. 2.33 se muestra el pseudocódigo del algoritmo.

Como entradas, se tienen la lista de celdas en el área de red planificada (previsiblemente, miles), la estadísticas de traspaso entre celdas tomadas del sistema de gestión de red y el conjunto de PCI disponibles configurado por el operador (como máximo, 504 valores). En el caso de los traspasos, se selecciona un periodo de tiempo lo suficientemente largo para que refleje las tendencias de movilidad en la red (p.ej., una semana). Como salida, se obtiene la partición del grafo principal (CC), donde se comprueban los problemas de colisión y confusión de PCI, de la que dependen las particiones de los otros dos grafos (DLRS y ULRS).

En la Fase 0 (*construcción del grafo*), se define la estructura del grafo mediante las ecuaciones (2.38)-(2.42) descritas en la sección 2.5.1. Como se comentó anteriormente, la red se modela como un grafo,  $G = (V, E)$ . Los vértices del grafo,

---

**Función** Algoritmo\_coloración\_grafos ( $C, HO_{ij}, P$ )

Entradas:  $C \equiv$  lista de celdas,  $HO_{ij} \equiv$  estadísticas de traspasos,  $P \equiv$  conjunto de PCI disponibles,

Salidas: Partición del grafo CC,  $\Pi_{CC}$  (plan PCI)

% Fase 0: Construcción del grafo

Contruir el grafo de red básico,  $G = (V, E)$

$V \equiv$  celdas,  $E = E^1UE^2$ ,  $E^1 \equiv$  adyacencias con traspasos,  $E^2 \equiv$  adyacencias entre vecinas de la misma celda

Calcular el peso de las aristas,  $\gamma_{ij} = (\gamma_{ijCC}, \gamma_{ijDLRS}, \gamma_{ijULRS})$

$\gamma_{ijCC}$  [Eq. (2.34)-(2.36)]  $\gamma_{ijDLRS}$  [Eq. (2.37)],  $\gamma_{ijULRS}$  [Eq. (2.38)]

Separar el grafo de red básico en tres grafos  $G_{CC}, G_{DLRS}, G_{ULRS}$

$G_{CC} = (V, E) \setminus_{\gamma_{ij}=\gamma_{ijCC}}, G_{DLRS} = (V, E) \setminus_{\gamma_{ij}=\gamma_{ijDLRS}}, G_{ULRS} = (V, E) \setminus_{\gamma_{ij}=\gamma_{ijULRS}}$

% Fase 1: Engrosamiento

**Repetir** % Para los diferentes niveles de engrosamiento

Calcular la distancia en saltos entre cada par de vértices con el algoritmo de Floyd-Warshall

Ordenar las parejas de vértices en término de distancia de saltos en orden decreciente

**Repetir** % Para las diferentes parejas de vértices en el mismo grafo

Seleccionar la siguiente pareja de vértices sin emparejar con la mayor distancia en saltos

**hasta que** todos los vértices estén marcados o el número de vértices del grafo colapsado sea igual al número de PCIs disponibles

Contruir la versión colapsada de los grafos CC, DLRS y ULRS uniendo los vértices emparejados

**hasta que** el número de vértices del grafo colapsado sea igual al número de PCIs disponibles

% Fase 2: Partición inicial

Construir una partición para el grafo CC asignando directamente cada subdominio disponible cada vértice del grafo colapsado

$\Pi_{CC}^n = P$

Derivar las particiones en los grafos DLRS y ULRS a partir de la partición en el grafo CC

$\Pi_{DLRS}^n = \text{mod}(\Pi_{CC}^n, 3 \text{ or } 6)$  [Eq. (2.43)],  $\Pi_{ULRS}^n = \text{mod}(\Pi_{CC}^n, 30)$  [Eq. (2.44)]

% Fase 3: Desdoblamiento

**Repetir**

Desdoblar la versión colapsada de los grafos CC, DLRS y ULRS en base al patrón de unión utilizado

Desdoblar la versión colapsada de las particiones de CC, DLRS y ULRS en base al patrón de unión utilizado

Refinar la partición en el grafo CC con el algoritmo de Fiduccia-Matheysses (Fig. 2.31)

**hasta que** el grafo desengrosado sea el grafo original

Derivar las particiones en los grafos DLRS y ULRS a partir de la partición en el grafo CC original

$\Pi_{DLRS}^0 = \text{mod}(\Pi_{CC}^0, 3 \text{ or } 6)$  [Eq. (2.43)],  $\Pi_{ULRS}^0 = \text{mod}(\Pi_{CC}^0, 30)$  [Eq. (2.44)]

---

FIGURA 2.33: Pseudocódigo del algoritmo de planificación de PCI propuesto.

$V$ , representan las celdas y el conjunto completo de aristas,  $E$ , es la unión de dos subconjuntos de aristas,  $E^1$  and  $E^2$ . Las aristas en  $E^1$  unen cada celda con sus vecinas, mientras que las aristas en  $E^2$  unen vecinas de la misma celda. El peso de cada arista es una tripleta, formada por un peso para los problemas de colisión y confusión,  $\gamma_{ij_{CC}}$ , un peso para las colisiones de CRS en el enlace descendente,  $\gamma_{ij_{DLRS}}$ , y un peso para las colisiones de DM RS en el enlace ascendente,  $\gamma_{ij_{ULRS}}$ . Estos pesos representan la penalización asociada a cada uno de los problemas que aparecen cuando no se asigna correctamente el PCI entre celdas adyacentes.

Una vez construido el grafo, en la Fase 1 (*engrosamiento*), se simplifica progresivamente el grafo original. A diferencia del enfoque tradicional, donde se trata de agrupar los vértices unidos por las aristas de mayor peso, en este trabajo se unen los vértices con una relación más débil entre ellos. Con ello, se trata de que, al simplificar el grafo, se oculten las aristas de menor peso, para que la partición inicial sobre el grafo simplificado tenga el máximo corte de aristas. De esta manera, se favorece que los subdominios estén formados por celdas débilmente relacionadas, que se interfieren poco entre sí.

En este trabajo, la relación entre cada pareja de vértices se define por la distancia entre ellos sobre el grafo, medida en saltos, que se calcula mediante el algoritmo de Floyd-Warshall [75]. Una vez calculada la matriz de distancias entre vértices, las parejas de vértices se ordenan en base a su distancia, y aquéllos cuya distancia sea mayor se emparejan primero. Como resultado de la unión, se obtiene una versión colapsada de los grafos CC, DLRS y ULRS, donde el conjunto de aristas incidentes en el nuevo vértice es la unión de las aristas incidentes en los vértices colapsados. El engrosamiento continúa hasta que el número de vértices en el grafo colapsado es igual al número de PCIs disponibles (504 como máximo).

En la Fase 2 (*partición inicial*), se realiza una asignación directa de los posibles valores de PCI a los vértices del grafo CC simplificado. Las particiones en los grafos DLRS y ULRS se derivan de la partición en el grafo CC, como

$$\Pi_{DLRS}^n = \begin{cases} \text{mod}(\Pi_{CC}^n, 3) & \text{si el eNB tiene 2 o más antenas transmisoras,} \\ \text{mod}(\Pi_{CC}^n, 6) & \text{si el eNB tiene 1 sola antena transmisora,} \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\Pi_{ULRS}^n = \text{mod}(\Pi_{CC}^n, 30), \quad (2.48)$$

---

**Función** Refinamiento<sub>Local</sub> ( $G_{CC}, G_{DLRS}, G_{ULRS}, \Pi_{CC}$ )

Entradas:  $G_{CC}, G_{DLRS}, G_{ULRS} \equiv$  Grafos CC/DLRS/ULRS,  $\Pi_{CC} \equiv$  partición CC

Salida:  $\Pi'_{CC} \equiv$  Partición CC refinada

**Para** un número predeterminado de iteraciones

**Para** un número predeterminado de pasadas

Fijar el estado de cada nodo a no marcado

Derivar las particiones DLRS y ULRS de la partición CC

$$\Pi_{DLRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, 3 \text{ or } 6) \text{ [Eq. (2.43)],}$$

$$\Pi_{ULRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, 30) \text{ [Eq. (2.44)]}$$

**Para** cada vértice  $i$

Calcular la ganancia potencial de asignar el vértice  $i$  a un subdominio diferente  $P(i)$

$$g(i, p') = \Delta F(\Pi_{CC}) = F(\Pi_{CC})|_{\Pi_{CC}(i)=p} - F(\Pi_{CC})|_{\Pi_{CC}(i)=p'} \text{ [Eq. (2.45)]}$$

$$g^*(i) = \max_{p'} g(i, p')$$

$$p^*(i) = \text{argmax}_{p'} g(i, p')$$

**Fin**

Ordenar los vértices an sin marcar en base a  $g^*(i)$

**Repetir** % Re-asignación de un vértice

Seleccionar el vértice sin marcar  $i$  con mayor  $g^*(i)$

Reasignar  $i$  al subdominio  $p^*(i)$

Fijar el estado de los vértices re-asignados  $i$  a marcados

Actualizar la partición en los grafos DLRS y ULRS

$$\Pi_{DLRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, 3 \text{ or } 6) \text{ [Eq. (2.43)],}$$

$$\Pi_{ULRS} = \text{mod}(\Pi_{CC}, 30) \text{ [Eq. (2.44)]}$$

Guardar la partición intermedia CC y calcular el coste intermedio total

$$F(\Pi_{CC})$$

$$F(\Pi_{CC}) = \sum_{\substack{(i,j) \in E \\ \Pi_{CC}(i) = \Pi_{CC}(j)}} \gamma_{ij_{CC}} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{DLRS}(i) = \Pi_{DLRS}(j)}} \gamma_{ij_{DLRS}} + \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{ULRS}(i) = \Pi_{ULRS}(j)}} \gamma_{ij_{ULRS}} \text{ [Eq.(2.39)]}$$

Actualizar las ganancias potenciales y los mejores subdominios objetivo de los vértices sin marcar,  $g^*(i)$  y  $p^*(i)$

**hasta que** no haya vértices sin marcar o el número de movimientos

consecutivos sin reducir el coste total exceda cierto límite

Restaurar la solución intermedia con el coste total más bajo

**Fin Para**

**Fin Para**

---

FIGURA 2.34: Pseudocódigo del algoritmo de Fiduccia-Mattheyses propuesto.

donde  $\Pi'_{CC}$  es la partición del grafo CC simplificado (es decir, en el nivel de engrosamiento máximo,  $n$ ), y el valor 3 o 6 en (2.47) depende de la configuración de antenas transmisoras en el enlace descendente.

En la Fase 3 (*desdoblamiento*), los tres grafos y las tres particiones se despliegan, siguiendo el esquema de emparejamiento definido en la fase de engrosamiento. Después de cada operación de desdoblamiento, la partición en el grafo CC se refina mediante una versión modificada del algoritmo de refinamiento local de

*Fiduccia-Mattheyses* [74]. El pseudocódigo del algoritmo desarrollado se presenta en la Fig. 2.34. El algoritmo consiste en una serie de pasos. En cada paso, el algoritmo primero calcula la ganancia de reasignar cada vértice (es decir, cada celda),  $i$ , de su subdominio actual,  $p$ , a un subdominio diferente,  $p'$ , en el grafo CC. Dicha ganancia se calcula como

$$\begin{aligned}
 g(i, p') = \Delta F(\Pi_{CC}) = F(\Pi_{CC})|_{\Pi_{CC}(i)=p} - F(\Pi_{CC})|_{\Pi_{CC}(i)=p'} = \\
 \left( \sum_{\substack{(i,j) \in E \\ \Pi_{CC}(i)=\Pi_{CC}(j)}} \gamma_{ij_{CC}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p} - \sum_{\substack{(i,j) \in E \\ \Pi_{CC}(i)=\Pi_{CC}(j)}} \gamma_{ij_{CC}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p'} \right) + \\
 \left( \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{DLRS}(i)=\Pi_{DLRS}(j)}} \gamma_{ij_{DLRS}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p} - \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{DLRS}(i)=\Pi_{DLRS}(j)}} \gamma_{ij_{DLRS}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p'} \right) + \\
 \left( \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{ULRS}(i)=\Pi_{ULRS}(j)}} \gamma_{ij_{ULRS}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p} - \sum_{\substack{(i,j) \in E^1 \\ \Pi_{ULRS}(i)=\Pi_{ULRS}(j)}} \gamma_{ij_{ULRS}} \Big|_{\Pi_{CC}(i)=p'} \right). \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

Para cada vértice, se selecciona el mejor subdominio objetivo,  $p^*(i)$ , como aquél con la ganancia mayor,  $g^*(i)$ . Después, se reasigna el vértice con la ganancia mayor y se marca para ser descartado para los siguientes pasos. Este proceso se repite hasta que no haya vértices sin marcar. Es importante recalcar que cualquier reasignación de un vértice a un subdominio diferente en el grafo CC requiere actualizar la partición en los grafos DLRS y ULRS según (2.47)-(2.48). Esta operación, que permite manejar la función de coste multiobjetivo, constituye la principal diferencia respecto a la versión clásica del algoritmo de Fiduccia-Mattheyses. Tras cada paso, se selecciona la solución con menor coste  $F(\Pi_{CC})$ . Para reducir la carga computacional, el refinamiento solo se lleva a cabo en vértices que comparten el subdominio con algunos de sus vecinos adyacentes, es decir, vértices que tienen igual valor de  $PCI$ , igual  $PCI \bmod 3$  (ó  $PCI \bmod 6$ ) o igual  $PCI \bmod 30$ . Estos vértices pueden reasignarse a cualquier subdominio cuando se refina una solución (y no solo a los subdominios de sus vértices adyacentes, como en la partición de grafos clásica).

Teóricamente, la parte de mayor complejidad computacional del algoritmo descrito es el algoritmo de Floyd-Warshall para calcular la distancia entre vértices, con una complejidad  $O(|V|^3)$ , donde  $|V|$  es el número de vértices en el grafo [76] [77].

En la práctica, el tiempo de ejecución está dominado por el algoritmo de refinamiento, cuyo tiempo crece linealmente con el número de vértices del grafo [74].

## 2.6. Análisis de rendimiento

El método propuesto se prueba en una instancia del problema construida con datos de una red LTE real. Por claridad, se describe primero la preparación del estudio y posteriormente se comentan los resultados obtenidos.

### 2.6.1. Metodología experimental

En el análisis, se considera un segmento de una red real de 620 celdas y 5986 adyacencias, que cubren un área geográfica de 290 km<sup>2</sup>. La Fig. 2.35 muestra el grafo construido a partir de la información de la red. Los vértices del grafo, que representan las celdas, aparecen en las coordenadas de los emplazamientos que albergan las estaciones base. Las aristas en el grafo representan las relaciones de adyacencias entre las estaciones base. Dos celdas se consideran adyacentes si hay traspasos entre ellas, lo que se conoce mediante las estadísticas de traspaso de la red. En la figura, se observa que algunas celdas están aisladas, ya que no tienen ni traspasos entrantes ni salientes. Se asume que estas celdas no causan problemas de colisión y confusión al estar aisladas. Dentro del algoritmo, estas celdas tendrán un valor de distancia infinita (en saltos) respecto al resto de vértices.

Las entradas del algoritmo se recogen de los parámetros de configuración y las medidas de rendimiento (es decir, los traspasos) disponibles en el sistema de gestión de red. A partir de estos datos, se construye el grafo de la red. Las aristas se derivan de las estadísticas de traspasos, mientras que los pesos de las aristas se calculan a partir de los parámetros de prioridad y las estadísticas de traspasos y carga de las celdas con (2.38)-(2.42). Para facilitar el análisis, se asume que la carga de la celda (es decir, el ratio de utilización de PRBs) es la misma para todas las celdas de la red, tanto en el enlace ascendente como descendente, de forma que  $L_{DLi} = L_{ULi} = 50\% \forall i$ . Eliminando la influencia de la carga de celda en la probabilidad de colisión de las señales de referencia CRS y DM RS, es más fácil mostrar el impacto de los pesos de prioridad en el número de colisiones. De igual

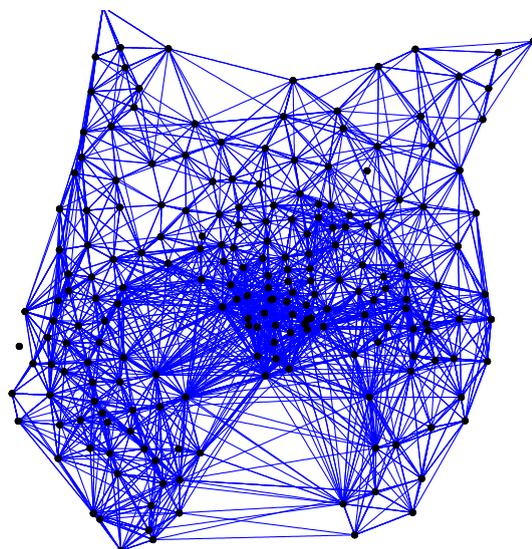


FIGURA 2.35: Grafo de red.

forma, se asume que el salto de grupo de secuencia base está inactivo en el enlace ascendente, al ser el caso más habitual en las redes reales.

Se prueban seis estrategias distintas de planificación del PCI. Cuatro de estos seis planes se obtienen con el algoritmo propuesto, simplemente configurando los parámetros internos de prioridad,  $ColW$ ,  $ConfW$ ,  $DLRSW$  y  $ULRSW$ , como se describe a continuación:

- *Plan aleatorio*. Este plan de PCI se construye asignando el PCI a las celdas de manera aleatoria. Para mejorar la calidad de la solución, se construyen 100 planes aleatorios y se selecciona el mejor de todos.
- *Plan ColConf*. Este plan de PCI está diseñado para evitar colisiones y confusiones de PCI. Con este propósito, el algoritmo propuesto se configura con  $ColW = ConfW = 1$ ,  $DLRSW = 0$ ,  $ULRSW = 0$ .
- *Plan DL*. Este plan de PCI está diseñado para minimizar el número de colisiones de CRS en el enlace descendente. Como la utilización es la misma para todas las celdas, este plan busca reducir el número de colisiones CRS en toda la red. Con este propósito, el algoritmo propuesto se configura internamente con  $ColW = ConfW = 0$ ,  $DLRSW = 1$ ,  $ULRSW = 0$ .

- *Plan UL*. Este plan de PCI está diseñado para minimizar el número de colisiones de DM RS en el enlace ascendente. Con este propósito, el algoritmo propuesto se configura con  $ColW = ConfW = 0$ ,  $DLRSW = 0$ ,  $ULRSW = 1$ .
- *Plan ColConfDLUL*. Este plan de PCI se construye teniendo en cuenta todas las restricciones. Con este propósito, el algoritmo propuesto se configura con  $ColW = ConfW = 1$ ,  $DLRSW = 1$ , y  $ULRSW = 1$ .
- *Plan base*. El plan utilizado como referencia de comparación es el plan de PCI actualmente implementado en la red real, que solo tiene en cuenta problemas de colisión y confusión de PCI.

En los planes ColConf, DL, UL y ColConfDLUL, la mejor partición se construye ejecutando el algoritmo heurístico multinivel descrito en la sección anterior sobre los grafos construidos con diferentes pesos de prioridad. Utilizando el mismo algoritmo para cuatro de los enfoques presentados aquí, se intenta mostrar el impacto de formular el problema con diferentes restricciones. Se espera que el algoritmo multinivel propuesto ofrezca soluciones de muy alta calidad (es decir, casi óptimas), como demuestran estudios anteriores [71]. Todos estos planes son deterministas, por lo que no requieren ejecutar el algoritmo varias veces, a diferencia del plan aleatorio, que es el mejor de 100 intentos.

Los indicadores de rendimiento utilizados para evaluar la calidad de un plan de PCI son: a) el número de adyacencias con problemas de colisión/confusión, y b) el número total de traspasos entre celdas cuyas señales de referencia colisionan en el enlace ascendente o descendente.

El objetivo de usar estos últimos indicadores basados en traspasos, en vez de simplemente el número de adyacencias donde existen colisiones, es cuantificar no solo el número de colisiones, sino también la severidad de estas colisiones en términos de interferencia. Así, un plan de PCI apropiado debe no solo reducir el número de colisiones entre celdas, sino también evitar aquéllas con niveles de interferencia mayores. Con ello, se asume que aquellas adyacencias con mayor número de traspasos suelen ser aquéllas en las que las celdas se sitúan más próximas geográficamente (y, por ello, se interfieren más).

El tiempo de ejecución se utiliza también como un criterio de rendimiento secundario. Con este propósito, se han desarrollado todos los algoritmos en Matlab.

TABLA 2.11: Comparación del rendimiento de diferentes planes de PCI.

Plan	Nº. col de PCI [adyacencias]	Nº. conf de PCI [adyacencias]	Nº. colisiones de CRS [traspasos]	Nº. colisiones de DM RS [traspasos]
Aleatorio	10	35	6243 (-3.22 %)	567 (-77.18 %)
Base (operador)	0	0	6048	320
ColConf	0	0	4248 (29.76 %)	90 (71.87 %)
DL	0	2	1634 (72.98 %)	86 (73.125 %)
UL	0	3	3788 (37.36 %)	24 (92.5 %)
ColConfDLUL	0	0	2338 (61.55 %)	52 (83.75 %)

Las diferentes rutinas se ejecutan en un ordenador con un procesador de 2 núcleos, una frecuencia de reloj de 2.6 GHz y 8 GB de memoria RAM.

## 2.6.2. Análisis de resultados

La Tabla 2.11 muestra los resultados de los distintos planes de PCI, incluyendo el número de problemas de colisión y confusión, y el número de traspasos entre celdas que comparten las mismas señales CRS y DM RS en los enlaces descendente y ascendente, respectivamente. Para comparar los planes, se muestran entre paréntesis las mejoras obtenidas con cada plan respecto al plan del operador (base). Una primera inspección de la tabla muestra que el plan de PCI no debe construirse aleatoriamente, ya que esto conlleva muchos problemas de colisión y confusión de PCI innecesarios (específicamente, 45 para un conjunto de 620 celdas). Por contra, el plan base del operador actualmente implementado en la red consigue evitar estos problemas. Sin embargo, el número de colisiones de CRS y DM RS está cerca al obtenido con un plan aleatorio de PCI. Obviamente, el número de adyacencias problemáticas es mayor en el enlace descendente que en el ascendente, por el menor número de valores posibles sin colisión (3 frente a 30).

El resto de planes, contruidos con el método propuesto, optimiza el criterio priorizado con la configuración de parámetros seleccionada (ya sean colisiones/confusiones de PCI, colisiones de CRS o colisiones de DM RS). De manera particular, el plan ColConf elimina por completo los eventos de colisión/confusión de PCI, pero las colisiones de señales de referencia solo se reducen un 29.76 % y 71.87 % para el enlace descendente y el enlace ascendente, respectivamente. Ésta es una clara evidencia de la necesidad de considerar estas señales de referencia a la hora de construir un plan de PCI. Los planes DL/UL consiguen reducir las colisiones de señales de referencia aún más, a costa de causar algunos problemas de colisión o confusión. El mejor compromiso se consigue con el plan ColConfDLUL, que elimina todos los problemas de colisión/confusión de PCI a la vez que se obtienen

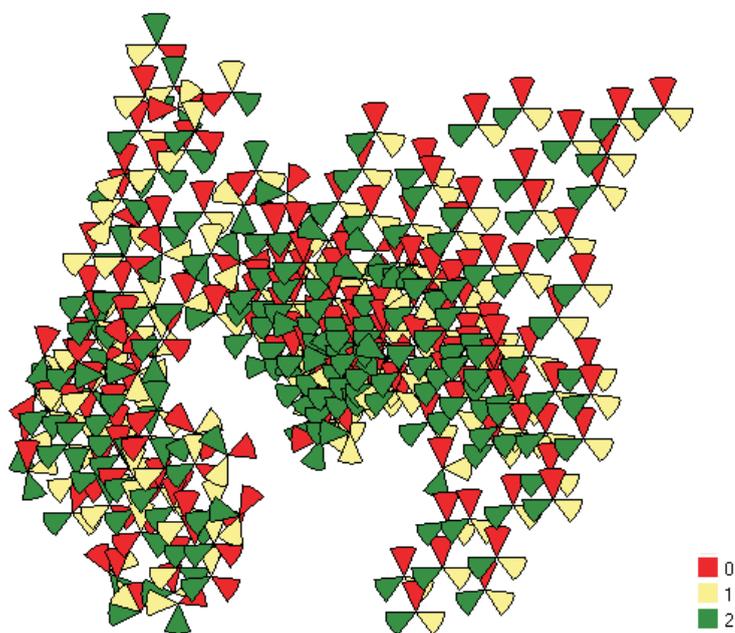
indicadores de colisiones de señales de referencia en ambos enlaces cercanos a los obtenidos con los planes diseñados específicamente para esos criterios.

La Fig. 2.36 muestra gráficamente la estructura del plan ConfDLUL, representando la partición obtenida para las restricciones del enlace descendente y ascendente (plan de PSS y DM RS, respectivamente). En ambas figuras se aprecia cómo el algoritmo consigue que los valores de PSS y DM RS no se compartan por sectores cercanos.

Eliminando los problemas de colisión y confusión en los diferentes niveles, el plan resultante asegurará la identificación correcta de vecinas, mejorará la calidad de las estimas de canal en el enlace descendente y reducirá el número de fallos en el PUCCH, lo que se traducirá en una gestión de la movilidad más robusta, una mayor eficiencia espectral del sistema y una tasa de transmisión de datos de usuario más alta tanto en el enlace ascendente como descendente.

Para comprobar el compromiso entre el rendimiento del enlace ascendente y descendente, el algoritmo se prueba con diferentes configuraciones de prioridad modificando gradualmente los parámetros  $ULRSW$  y  $DLRSW$ . La Fig. 2.37 muestra la mejora relativa en el número de colisiones de CRS y DM RS con respecto a la solución del operador. Las combinaciones de parámetros a la izquierda y derecha de la figura se corresponden con los planes DL y UL, cuyo rendimiento se muestra en la Tabla 2.11. Como es lógico, cuanto mayor prioridad se dé al enlace ascendente, mayor es la reducción en colisiones de DM RS. Se observa igualmente que la mitad de la máxima ganancia potencial que se obtiene con una planificación cuidada de DM RS puede lograrse aumentando las colisiones CRS solamente en un 10 % (para el caso de  $DLRSW = 0.75$  y  $ULRSW = 0.25$ ).

Para finalizar, la Tabla 2.12 muestra los tiempos de ejecución para las distintas estrategias. Se observa que el enfoque aleatorio tiene un tiempo de ejecución despreciable. En los 100 intentos probados, el valor medio fue de 0.0092 segundos con un intervalo de confianza del 95-percentil de [0.002-0.0312] segundos. Por el contrario, el método propuesto, *ColConfDLUL*, tarda 720 segundos. Aun así, este tiempo es lo suficientemente pequeño como para utilizar el método en tareas de planificación.



(a) Plan de PSS (PCI módulo 3)



(b) Plan de DM RS (PCI módulo 30)

FIGURA 2.36: Mapa del plan considerando todas las restricciones (ColConfD-LUL).

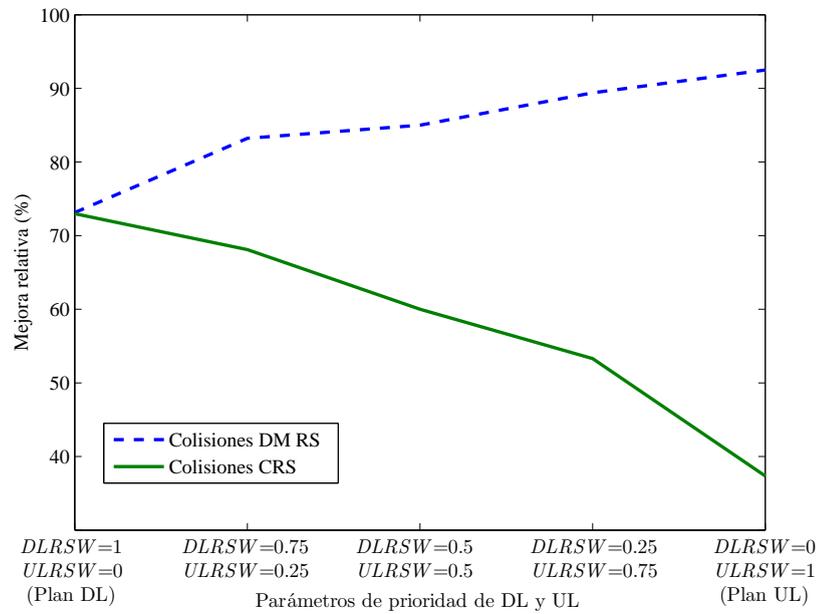


FIGURA 2.37: Compromiso entre colisiones del enlace descendente y ascendente en el método propuesto.

## 2.7. Conclusiones

En este estudio, se ha presentado un método heurístico para la planificación de identificadores de celda (PCI) en un sistema LTE, basado en datos de configuración y rendimiento disponibles en el sistema de gestión de red. A diferencia de enfoques anteriores, que tratan de forma aislada los problemas causados por el PCI, el método propuesto consigue reducir simultáneamente los problemas de colisión y confusión, y las colisiones de señales de referencia tanto en el enlace descendente (CRS) como en el ascendente (DM RS en el PUCCH).

Para ello, primero se ha realizado un estudio exhaustivo del impacto de la planificación de PCI en el enlace descendente y ascendente de LTE, para definir los requisitos que un plan de PCI debe cumplir e identificar en qué condiciones estos requisitos no se cumplen. A partir de este estudio, se han propuesto dos modelos

TABLA 2.12: Tiempos de ejecución en los distintos planes de PCI.

Planes	Aleatorio	ColConf	DL	UL	ColConfDLUL
Tiempo de ejecución [s]	0.0092	124	660	320	720
	[0.002-0.312]				

analíticos de sistema para evaluar la influencia de la asignación de PCI en el rendimiento de los canales PDSCH y PUCCH. Estos modelos se han introducido en sendas herramientas de simulación, con las que se han identificado las limitaciones de una mala planificación de PCI.

Una vez establecidos los requisitos, la asignación de PCI se ha formulado como un problema de partición de grafos multiobjetivo. Para su resolución, se ha adaptado un algoritmo de partición de grafos multinivel, que, a diferencia de los clásicos, está diseñado específicamente para colorear un grafo y es capaz de evaluar el compromiso entre múltiples objetivos. El algoritmo propuesto se ha desarrollado en Matlab.

La evaluación del rendimiento se ha llevado a cabo con grafos construidos a partir de datos de una red real. Los resultados muestran que el algoritmo puede eliminar completamente los problemas de colisión y confusión, a la vez que reduce las colisiones de señales de referencia del enlace descendente hasta un 62 % y las del canal del control del enlace ascendente hasta un 84 %, comparado con la solución actualmente desplegada en la red.

Los métodos propuestos pueden implementarse en la red como una solución centralizada o distribuida. En la solución centralizada, las estaciones base se encargan de recopilar las medidas del número de traspasos y las medidas de carga de celda. Estos datos se envían periódicamente hacia el sistema de gestión de red, donde se ejecuta una versión centralizada del algoritmo de planificación propuesto. Finalmente, la salida del algoritmo (es decir, el valor de PCI asignado a cada celda) se envía de vuelta a cada estación base, que lo difunde al usuario en un canal de control común. En la solución distribuida, cada estación base debe intercambiar la información necesaria para construir una pequeña porción del grafo con las celdas de alrededor. Esta información consiste en la lista de PCIs, los traspasos y las cargas de celda. Esta información puede intercambiarse periódicamente a través de la interfaz X2, que une celdas adyacentes. Después, se ejecuta un algoritmo de refinamiento local para decidir la reasignación del valor de PCI de forma que se reduzcan los problemas de colisión y confusión con las celdas de alrededor. Como suele ocurrir en otros sistemas distribuidos, esta solución debe diseñarse para evitar problemas de inestabilidad causados por el cambio de PCI de celdas vecinas, y sólo garantiza un mínimo local en la función de coste del sistema.

## Capítulo 3

# Agrupación automática de emplazamientos en redes LTE heterogéneas

Los estudios pronostican que el tráfico en las redes móviles se incrementa considerablemente en los próximos años. Así, se prevé que el tráfico móvil se multiplique por 10 desde 2014 hasta 2019 [78]. En paralelo, las encuestas predicen que más del 70 % de este tráfico se cursará en interiores, a pesar de que más de la mitad de los hogares y negocios tienen una cobertura de interior pobre [79] [80]. Con esta situación, es necesario desarrollar soluciones que ofrezcan una cobertura adecuada en edificios con un coste razonable.

Los sistemas celulares heterogéneos, que combinan celdas tradicionales (macrocelas, microcelas, ...) con celdas pequeñas (*small cells*) demuestran ser una solución barata y efectiva para proporcionar una cobertura adecuada en edificios. Sin embargo, la inclusión de cualquier nuevo emplazamiento de interior requiere evaluar el compromiso entre la ganancia obtenida en cobertura y capacidad frente al coste de la infraestructura requerida.

Para reducir costes, algunos fabricantes ofrecen soluciones que combinan un sistema radiante distribuido de interior con un procesado en banda base centralizado en los emplazamientos de exterior. De esta forma, se consigue un sistema de interior económico y modular, a la vez que se asegura una mejor integración entre ambas capas de red y se simplifica la gestión de operadores, administradores de sistemas y propietarios de negocios.

En este capítulo, se estudian métodos de asignación de emplazamiento para celdas de interior que emplean técnicas de agrupamiento basadas en teoría de grafos. El capítulo se inicia con un análisis del estado de la técnica y la investigación en sistemas celulares de interior. A continuación se formula matemáticamente el problema de asignación de celdas pequeñas a emplazamientos en redes heterogéneas con interfaces radio distribuidas. Seguidamente, se plantea el método de agrupamiento propuesto, basado en un algoritmo de refinamiento local. El algoritmo se prueba en un escenario de red heterogénea real, teniendo en cuenta las especificaciones del fabricante y las restricciones del operador. Finalmente, se resumen las principales conclusiones extraídas del estudio.

### 3.1. Introducción

Ofrecer cobertura y capacidad en interiores ha sido un reto desde el principio de las redes móviles. Para conseguirlo, la estrategia habitual de los operadores ha sido aumentar el número de emplazamientos con el fin de mejorar la calidad del enlace acercando los extremos de la comunicación y aumentar la reutilización espacial del espectro disponible. Esto ha llevado aparejado un incremento del coste de la infraestructura de red, que hoy en día resulta inviable por la reducción de márgenes empresariales.

Como alternativa, en los últimos años se han desplegado redes de femtoceldas [81] [82] [83], basadas en estaciones base de corto alcance, bajo coste y baja potencia, con retorno por el bucle de abonado. Estos sistemas trabajan correctamente en zonas aisladas, donde la densidad de celdas es reducida (p.ej., restaurantes, hogares, ...). Sin embargo, en escenarios más grandes, donde se requieren despliegues masivos (p.ej., campus, centros comerciales o edificios de negocios), la planificación de red y, sobre todo, la gestión de recursos radio, se vuelven inmanejables [84]. Así, para edificios grandes, se requieren características propias de las macroceldas, como son la coordinación entre celdas, la movilidad sin interrupciones o el manejo de la interferencia. Por razones obvias, todas estas funciones no se incluyen en estaciones base de bajo coste, como son las femtoceldas.

Durante las dos últimas décadas, los escenarios grandes con zonas de interior se han cubierto con sistemas de antenas distribuidas (*Distributed Antenna Systems*, DAS) [85] [86] [87]. Las soluciones DAS pueden clasificarse generalmente en tres

categorías: a) DAS pasivos, b) DAS activos y c) DAS híbridos [88]. Las soluciones con DAS pasivos se pueden utilizar en áreas pequeñas y en edificios donde no exista una gran cantidad de metal o muros de hormigón que bloqueen la señal de radiofrecuencia. Estas soluciones solo usan cable coaxial para distribuir la señal, siendo la opción más pequeña, más simple y a menudo la más barata de implementar. Las soluciones con DAS activos se utilizan para espacios mayores o espacios con mayor cantidad de materiales que actúen de barrera en la propagación radio. Estos sistemas activos utilizan cableado de fibra óptica para salvar distancias más grandes. Por último, las soluciones híbridas emplean una combinación de ambas soluciones, DAS activos y pasivos. En los sistemas DAS, las antenas de una celda se distribuyen en distintas posiciones a lo largo del área de cobertura. Acercando el transmisor al receptor, se mejora la eficiencia de potencia del enlace y se reduce la interferencia gracias a la gestión centralizada de recursos radio, pero manteniendo únicamente una celda [89].

Las soluciones basadas en DAS se implementan generalmente para ofrecer cobertura en edificios o espacios muy grandes. Su despliegue requiere de grandes proyectos de ingeniería de radiofrecuencia que pueden tomar semanas o meses. Así, estos sistemas son muy costosos y difíciles de actualizar para satisfacer las crecientes demandas de capacidad de datos móviles. Por ello, esta solución es poco eficiente en edificios medianos o grandes, donde la implementación de femtoceldas también se queda corta para soportar los nuevos requisitos de alta capacidad o de nuevos servicios avanzados. Para estos escenarios intermedios, con edificios medianos, una solución prometedora es la implementación de celdas pequeñas (*small cells*) [90]. Por celda pequeña, se entiende celdas de corto alcance que operan en frecuencias bajo licencia del operador celular. Un sistema de celdas pequeñas adopta una estructura de red jerárquica, que ofrece cobertura y capacidad en interiores, comportándose cada una de estas celdas como macroceldas en cuanto a coordinación de celdas se refiere.

La Fig. 3.1 muestra la estructura genérica de una solución escalable de celdas pequeñas para un edificio. El sistema consiste en una unidad de procesamiento en banda base, que controla varias cabeceras radio (*radio heads*), las cuales están a su vez a cargo de varias antenas, usualmente en la misma planta. La unidad de banda base es responsable del procesamiento de la señal de banda base. Los paquetes IP (*Internet Protocol*) recibidos del núcleo de red se modulan en señales digitales de banda base, que se transmiten a las cabeceras radio. De la misma forma, las



FIGURA 3.1: Arquitectura de un sistema genérico escalable de celdas pequeñas.

señales digitales de banda base recibidas por la unidad de banda base desde las cabeceras radio se demodulan, y se transmiten al núcleo de la red mediante paquetes IP. La unidad de banda base es también responsable del control del procesamiento y la monitorización de las llamadas. Por su parte, la cabecera radio convierte las señales digitales de banda base en señales de radiofrecuencia, que se amplifican y transmiten a los usuarios a través de las antenas.

Generalmente, las unidades de procesamiento en banda base se conectan a las cabeceras radio mediante fibra óptica bajo el estándar CPRI (*Common Public Radio Interface*) y las cabeceras radio a su vez se conectan a las antenas utilizando una interfaz de red de área local (Ethernet).

A diferencia de los sistemas de femtoceldas, los cuales tienen funcionalidades limitadas, las soluciones de celdas pequeñas ofrecen a los segmentos de interior la misma funcionalidad que las macroceldas de exterior. Con ello, la estructura completa se comporta como una macrocelda, permitiendo la coordinación con el resto de la red móvil, simplificando así las tareas de operación y mantenimiento de la red. Al mismo tiempo, como se ha comentado, las soluciones de celdas pequeñas mejoran la escalabilidad del sistema con respecto a los sistemas DAS, porque pueden ampliarse fácilmente.

### 3.1.1. Trabajo relacionado y contribución

La localización de emplazamientos de interior se puede formular como el problema clásico de optimización discreta conocido como localización de plantas con restricciones de capacidad (*Capacitated Facility Location Problem, CFLP*) [91] [92]. De manera similar a la planificación de redes macrocelulares, a la hora de incluir una celda pequeña en una red existente, existe un compromiso entre las mejoras obtenidas de cobertura/capacidad en el área de interior y los costes adicionales por la nueva infraestructura de red (conocida como solución en edificios, *In-Building Solution, IBS*).

La mayor parte de los estudios en este ámbito se han centrado en los beneficios del nuevo emplazamiento. Así, algunos trabajos han estudiado el impacto de la introducción de emplazamientos en el rendimiento de una red celular en términos de cobertura y/o de calidad de señal (SINR). Igualmente, se han propuesto diferentes métodos para encontrar la mejor ubicación para emplazamientos macrocelulares en términos de cobertura de red, calidad de conexión del usuario y/o capacidad de la red [93] [94] [95] [96] [97]. Estos métodos se han extendido después a las redes de interior. Así, diversos trabajos han aplicado métodos similares para definir la ubicación óptima de los puntos de acceso Wi-Fi dentro de edificios [98] [99] [100] [101] [102] [103] [104] [105]. Todos estos estudios construyen un modelo de sistema, sobre el que se aplica un algoritmo de optimización clásico para encontrar la mejor ubicación de los puntos de acceso, maximizando diversos indicadores de rendimiento de la red de manera conjunta. De igual forma, en [106], se presenta un análisis de diversas disposiciones de femtoceldas en un edificio para maximizar diferentes criterios, como la cobertura, la calidad de señal mínima o media, o el solapamiento entre celdas.

Sin embargo, pocos estudios han puesto el foco en los costes de implementación. Añadir una IBS requiere nuevos recursos de red (como, por ejemplo, antenas, unidades de banda base, cableado, ...). El coste de dicha infraestructura depende de las decisiones tomadas en la planificación de la red. La práctica habitual es asignar una unidad de banda base a cada edificio con una IBS por simplicidad. Esta decisión causa que, en edificios de tamaño mediano, se desperdicien recursos, porque la mayoría de los puertos de estas unidades de banda base quedan vacíos. Para estos casos, un algoritmo de agrupamiento puede reducir los costes de implementación, asignando cabeceras radio de diferentes edificios a una única

unidad de banda base. Como contrapartida, existe un incremento en los gastos del cableado, que, si la distancia entre la cabecera radio y la unidad de banda base es grande, podría ser mayor que la inclusión de una nueva unidad de banda base. De ello, se deduce que estas soluciones de agrupamiento serán más eficientes cuando los edificios se encuentren bastante próximos. Hasta donde se conoce, no existe ningún estudio que haya evaluado el uso de algoritmos de agrupamiento para compartir recursos entre edificios en el contexto de la selección de emplazamientos en interiores.

En esta tesis, se presenta un nuevo algoritmo de asignación de cabeceras radio a unidades de banda base, basado en teoría de grafos. El algoritmo propuesto está diseñado para integrarse en un algoritmo de selección de nuevos emplazamientos de una herramienta de planificación de red comercial. El resto del capítulo se organiza de la siguiente manera. La sección 3.2 describe el problema del agrupamiento de recursos físicos en redes de celdas pequeñas, como parte de la selección de nuevos emplazamientos de interior durante la fase de planificación de red. La sección 3.3 presenta el algoritmo de selección de emplazamientos de interior propuesto desarrollado en esta tesis. La sección 3.4 evalúa los resultados obtenidos con dicho algoritmo en un escenario de red LTE heterogénea real. Finalmente, la sección 3.5 resume las principales conclusiones de esta parte del trabajo.

## **3.2. Formulación del problema**

En esta sección se describe el problema del agrupamiento de recursos físicos en redes de celdas pequeñas para interior. Para ello, se introduce primero el problema general de la selección de nuevos emplazamientos, como marco conceptual en el que se integra el problema de agrupamiento estudiado.

### **3.2.1. Problema de selección de nuevos emplazamientos**

Una de las tareas más importantes dentro de la planificación de red es la selección de nuevos emplazamientos, como estrategia de ampliación de la red. En este proceso, además de seleccionar la ubicación de los emplazamientos de las estaciones base, deben planificarse y optimizarse otros parámetros de configuración de la red, como la potencia de transmisión o parámetros de las antenas, como los

ángulos de azimuth y elevación, o la altura de las mismas. En estas decisiones, el objetivo es minimizar la cantidad de infraestructura necesaria a desplegar mientras que se mantienen unos niveles de servicio apropiados, en términos de cobertura, capacidad y calidad.

La selección automática de emplazamientos se incluye como una funcionalidad de autoconfiguración (o autoplanificación) de la red [15]. Las entradas al proceso de selección de emplazamientos automático incluyen: a) información de la red, como los datos del terreno, las predicciones de propagación, o la distribución espacial de la demanda de tráfico, b) restricciones impuestas por el fabricante, como la potencia o capacidad de tráfico máxima de celda, rango de parámetros radio permitidos o el coste monetario de cada nuevo elemento de red necesario, y c) restricciones del operador, como los valores deseados de los distintos indicadores de rendimiento de red, la prioridad entre objetivos y el máximo presupuesto disponible. La salida del proceso es un conjunto de ubicaciones de emplazamientos que asegura el mejor rendimiento de red dado un conjunto de estaciones base ya existentes en la red, cumpliendo las restricciones de presupuesto.

El proceso de selección de emplazamiento requiere evaluar el beneficio de introducir cada nuevo emplazamiento. Durante dicha evaluación, la nueva estación base se sitúa en cada una de las localizaciones candidatas, asumiendo valores iniciales de sus parámetros radio por defecto. A partir de su ubicación, se calculan los valores de señal recibida en cada uno de los puntos geográficos del escenario como una función de la potencia de transmisión, las pérdidas de propagación y la posición relativa respecto al diagrama de radiación de la antena. Durante el proceso de búsqueda del mejor emplazamiento candidato, se explora el espacio de posibles soluciones, que contempla diferentes combinaciones de emplazamientos candidatos. El elevado número de combinaciones y parámetros a optimizar, y su interdependencia, hace que el proceso de diseño sea un problema de optimización enormemente complejo, que solo puede resolverse por métodos heurísticos.

La evaluación del rendimiento del conjunto de soluciones posibles debe considerar el compromiso existente entre los criterios de cobertura, calidad de conexión y capacidad de red. Para ello, la mayoría de herramientas de planificación comercial estiman primero los niveles de señal recibida, calidad de señal y utilización de recursos de celda por cada punto del área de servicio para una combinación de emplazamientos determinada. Estos mapas de los indicadores pueden construirse en base a predicciones o ajustarse con medidas de la red (p.ej., estadísticos del

sistema de gestión, *drive tests* [107] o trazas de conexión [108]). Después, en base a estos indicadores, se calcula una cifra global de penalización que mide el porcentaje del área global de servicio en el que se producen problemas de cobertura, calidad de señal y capacidad de celda [15]. La mejor solución es aquella combinación de emplazamientos (y parámetros de los mismos) que minimice la cifra global de penalización con el presupuesto disponible.

En el caso particular de la selección de emplazamientos de interior, el beneficio de incluir un nuevo emplazamiento suele describirse en términos del aumento del área de cobertura del sistema y el tráfico capturado por el emplazamiento de interior. Concretamente, la ganancia de cobertura de incluir un sistema de celdas pequeñas en un edificio (una IBS) viene dada por el conjunto de ubicaciones dentro del edificio que no estaban cubiertos adecuadamente antes (y que formaban, por tanto, un hueco de cobertura), y pueden servirse con el nuevo emplazamiento de interior. Igualmente, la ganancia de capacidad de cada nuevo emplazamiento de interior es el tráfico de macroceldas cercanas que se captura por el nuevo emplazamiento. Este indicador pretende cuantificar el alivio de tráfico en las macroceldas que se consigue con la solución de interior.

Una vez definida la función objetivo, la elección del algoritmo de búsqueda es crucial para encontrar en un tiempo razonable una solución adecuada del espacio de soluciones. Para ello, se han propuesto numerosos algoritmos heurísticos, entre los que se pueden citar algoritmos voraces [77], el recocido simulado [109], algoritmos genéticos [110] y algoritmos de búsqueda tabú [93].

Es importante recalcar que, mientras que los criterios de cobertura y/o la capacidad de red forman parte de la función objetivo a optimizar, el coste de implementación se utiliza únicamente como restricción. Es decir, se introducen tantos emplazamientos como permita el presupuesto dado por el operador. En el siguiente apartado, se introduce este coste de implementación como una nueva variable del algoritmo a tener en cuenta.

### **3.2.2. Problema de agrupamiento de celdas pequeñas por emplazamientos**

Este estudio asume una estructura de red de celdas pequeñas típica, como la mostrada en la Fig. 3.2. La figura muestra un ejemplo de un sistema de celdas

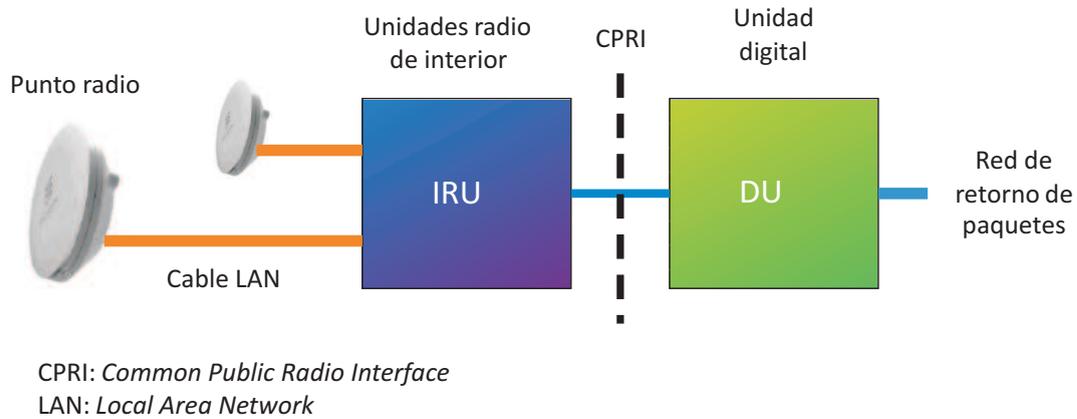
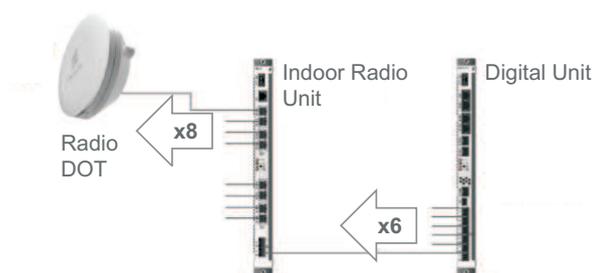


FIGURA 3.2: Estructura del sistema de celdas pequeñas *Radio Dots*.

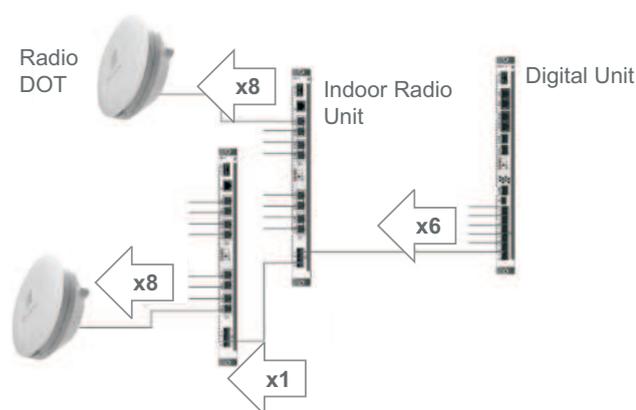
pequeñas, ofrecido por el fabricante *Ericsson*, comercializado con el nombre de *Radio Dot System* (RDS) [111]. El sistema RDS tiene una estructura centralizada con tres componentes: el punto radio (*Radio Dot*), que incluye las antenas, las unidades radio de interior (*Indoor Radio Unit*, IRU), que actúan como cabeceras radio, y la unidad digital (*Digital Unit*, DU), que trabaja como la unidad de procesamiento en banda base. Para el interfaz entre las unidades de radio de interior y las unidades digitales se utiliza el estándar *Common Public Radio Interface* (CPRI) [112].

El coste de la infraestructura depende del número de IBSs (es decir, del número de edificios), y del número y tipo de elementos del sistema implementados para cada IBS en el área geográfica considerada. Las reglas de dimensionado que permiten estimar el número de elementos necesarios son las siguientes:

1. El número de Radio Dots que se requieren para cada edificio se calcula a partir del área total que se desea cubrir (que depende de las dimensiones del edificio) y el área de cobertura máxima de un Radio Dot (ofrecida por el fabricante en las especificaciones técnicas del producto). Una cobertura típica para un equipo Radio Dot es de 500-800 m<sup>2</sup>.
2. El número de IRUs y DUs se determina a partir del número de Radio Dots previstos, considerando las restricciones de capacidad de los equipos. Como se muestra en la Fig. 3.3(a), una topología de estrella permite que 1 DU agrupe hasta 6 IRUs y 1 IRU agrupe hasta 8 Radio Dots. Con esta topología, se pueden soportar hasta 48 Radio Dots por DU. De manera alternativa, una topología en cascada, como la mostrada en la Fig. 3.3(b), permite que 2 IRUs



(a) Topología de estrella.



(b) Topología en cascada.

 FIGURA 3.3: Arquitectura del sistema celdas pequeñas *Radio Dots*.

se conecten en cascada a 1 puerto de la DU, soportando así hasta 96 Radio Dots ( $= 2 \text{ IRUs} * 48 \text{ radio dots/DU}$ ) por DU.

Dependiendo del tamaño del edificio, se pueden utilizar diferentes estructuras de IBS. La Fig. 3.4 muestra algunos ejemplos, dependiendo del área a cubrir. En la figura, las conexiones rojas representan conexiones mediante cable LAN, mientras que las conexiones azules representan conexiones mediante fibra óptica. Como se muestra en la figura, en edificios medianos o grandes, la DU y la IRU están colocadas en la misma posición, mientras que los Radio Dots se colocan con una topología de estrella. En caso de una estación base cercana, la DUs pueden colocarse junto a la macrocelda/microcelda/picocelda (por ejemplo, en el tejado del edificio). Esta estructura permite la coordinación avanzada entre cobertura de interior y de exterior. Por el contrario, para edificios muy grandes, las IRUs se distribuyen entre las plantas o entre diferentes segmentos del edificio. En caso de

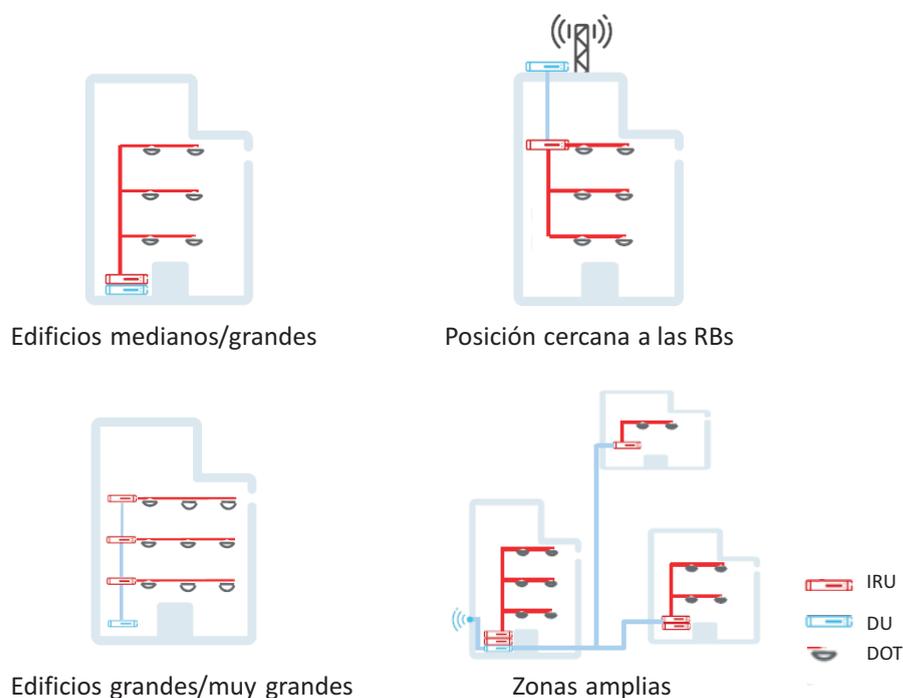


FIGURA 3.4: Ejemplos de estructura de red para interiores (IBS).

locales grandes, o con zonas dispersas, una DU central puede controlar diferentes zonas, de forma que cada zona no requiera su propia DU.

El uso de esta última estructura puede generalizarse para los edificios pequeños, donde no merece la pena colocar una DU propia si existen edificios próximos que ya tienen una DU. Es en estos casos donde se necesita un algoritmo de agrupamiento para comprobar cuándo esta estructura es posible, y evaluar si merece la pena en términos de ahorro. Cuando se asignan las IRUs/Radio Dots de un edificio a una DU de otro edificio, hay que tener en cuenta tres factores:

- la cantidad de Radio Dots requeridos por edificio (criterio de cobertura)
- la cantidad máxima de Radio Dots por cada IRU y de IRUs por cada DU (limitación de capacidad de los equipos)
- la distancia máxima entre IRUs (limitación de cableado y criterio de coste)

El objetivo del algoritmo de agrupamiento es agrupar tantos edificios en la misma DU como sea posible para minimizar los costes de implementación, a la

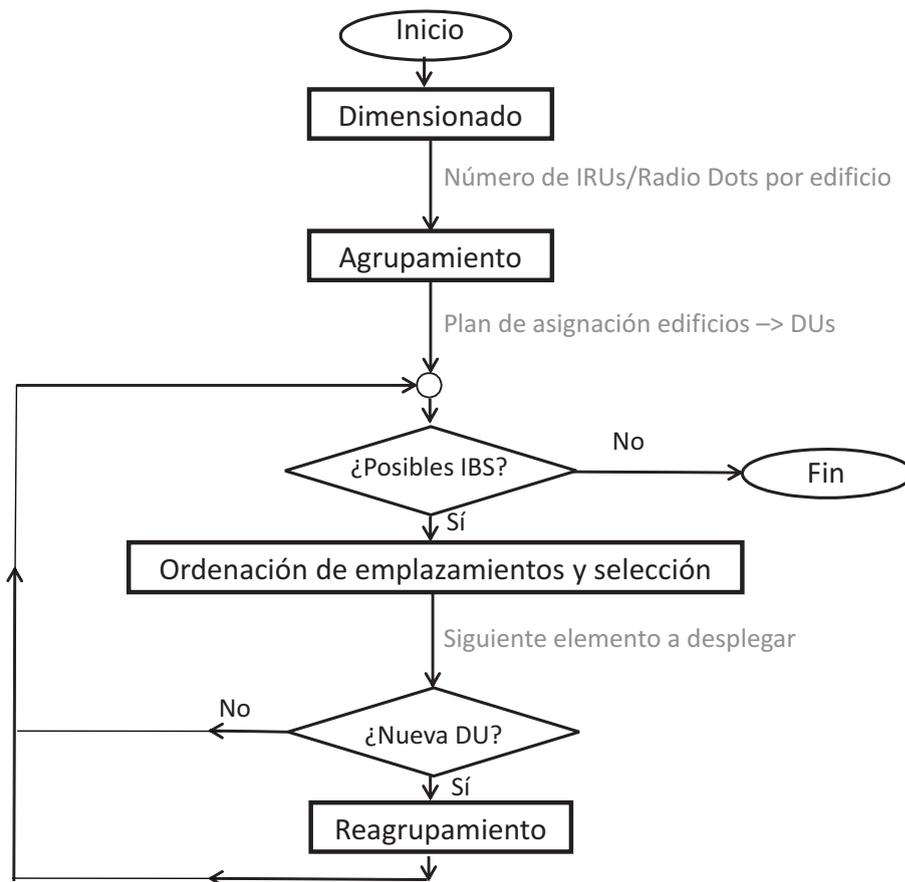


FIGURA 3.5: Diagrama de flujo del algoritmo de selección de emplazamiento.

vez que se satisfacen los requisitos de cobertura y capacidad en interiores, y las restricciones de cableado.

El algoritmo de agrupamiento debe integrarse en el algoritmo de selección de emplazamientos. De esta forma, se añade el coste de implementación de las soluciones de interior a los criterios tradicionales de cobertura y capacidad de red. En este trabajo, por simplicidad, se asume que el algoritmo de selección de emplazamientos solo considera como candidatos emplazamientos de interior.

### 3.3. Algoritmo de agrupamiento

La Fig. 3.5 muestra el diagrama de flujo completo del algoritmo de selección de nuevos emplazamientos de interior, que consta de cuatro procesos: dimensionado, agrupamiento, ordenación y reagrupamiento.

En la fase inicial de dimensionado, se estima el número de equipos necesarios para cubrir los requisitos de capacidad y cobertura en el área interior de cada edificio del escenario. Así, se obtiene una estimación del número de Radio Dots y de IRUs necesarios por edificio.

En la siguiente fase de agrupamiento (o *clustering*) se comprueba si los emplazamientos candidatos (es decir, los edificios) pueden asignarse a DUs ya existentes. Con esta medida, se intenta reducir el coste de implementación de la solución de interior compartiendo recursos entre emplazamientos vecinos.

Una vez definida la agrupación inicial, se inicia una serie de iteraciones en las que se van seleccionando secuencialmente los próximos emplazamientos de interior a desplegar. En cada iteración, se selecciona el candidato más rentable en términos de ganancia de cobertura y capacidad frente a costes de implementación. El número de iteraciones, que determina el número de nuevos emplazamientos a desplegar, depende del presupuesto disponible. Cuando, como parte del algoritmo de selección de nuevos emplazamientos, se introduce un nuevo emplazamiento que requiere una DU, un algoritmo de reagrupamiento evalúa si la asignación de edificios a una DU existente puede modificarse para reducir los costes de cableado. Con esta reasignación, se libera presupuesto para seguir introduciendo nuevos emplazamientos.

El algoritmo finaliza cuando se han incluido todos los edificios del escenario o cuando los costes de implementación superan la restricción de presupuesto definida por el operador.

Los siguientes párrafos describen todo este proceso con más detalle.

### **3.3.1. Dimensionado**

El algoritmo de dimensionado se aplica de manera independiente en cada edificio del escenario. El objetivo de este dimensionado es estimar el número de Radio Dots (es decir, antenas) e IRUs necesarias por edificio.

Dado el gran número de edificios que pueden existir en un escenario urbano, es habitual que las herramientas de planificación simplifiquen al máximo los cálculos de cobertura en interiores para reducir la carga computacional. En este trabajo, se asume que la cobertura en interiores es suficiente si se despliega un número

mínimo de antenas (*radio dots*), que depende de la superficie total del edificio. De esta manera, se obvia el problema de la selección de la ubicación óptima de las antenas, que requeriría realizar cálculos de propagación, interferencia, eficiencia espectral y carga con la herramienta de planificación. Esta asunción viene impuesta por la herramienta comercial para la que se diseña el algoritmo propuesto (*Ericsson Cell Optimizer*, ECO).

Para estimar la superficie de los edificios, es necesario conocer su geometría. Esta información puede extraerse de mapas digitales que incluyan una capa de información con la forma de los edificios mediante un poliedro, o como suele ser más frecuente, mediante un polígono en función de las coordenadas de la base y la altura. Así, la entrada al algoritmo con la información física de los edificios es una hoja de cálculo en formato .csv, donde cada fila representa un edificio (o parte del mismo, si tiene diferentes alturas) y las columnas describen los valores de longitud y latitud de los vértices del polígono que describe la base del edificio, y la altura del edificio. La Fig. 3.6 muestra un ejemplo de un edificio de 7 plantas con una planta poligonal. Conviene resaltar que, a priori, la ubicación exacta de las DUs dentro de los edificios no tiene efecto en las restricciones del diseño de la IBS, ya que las DUs se localizan normalmente en habitaciones acondicionadas para ello (o cerca de las estaciones base tradicionales, si existen). Sin embargo, para poder calcular los costes de cableado, es preciso conocer la ubicación exacta de la DU. Se asume aquí que la DU se ubica en la planta baja y en el centro del edificio, calculado éste como el promedio de las coordenadas de los vértices del polígono que define la planta del edificio.

Una vez se conocen las dimensiones de la planta y el número de plantas de cada edificio, el número de Radio Dots en un edificio  $i$  se calcula por una simple *regla de tres* como:

$$N_{dot/planta}(i) = \lceil S_{planta}(i)/S_{dot} \rceil , \quad (3.1)$$

$$N_{dot}(i) = N_{dot/planta}(i) N_{plantas}(i) , \quad (3.2)$$

donde  $N_{dot}(i)$ ,  $N_{dot/planta}(i)$  y  $N_{plantas}(i)$  son el número de Radio Dots, el número de Radio Dots por planta y el número de plantas en el edificio  $i$ , respectivamente,  $S_{planta}(i)$  es el área de la planta (en m<sup>2</sup>) del edificio  $i$  y  $S_{dot}$  es la cobertura mínima del Radio Dot (en m<sup>2</sup>), estimada sin considerar la geometría del edificio bajo estudio.  $S_{dot}$  es un parámetro de diseño, tomado de las especificaciones técnicas

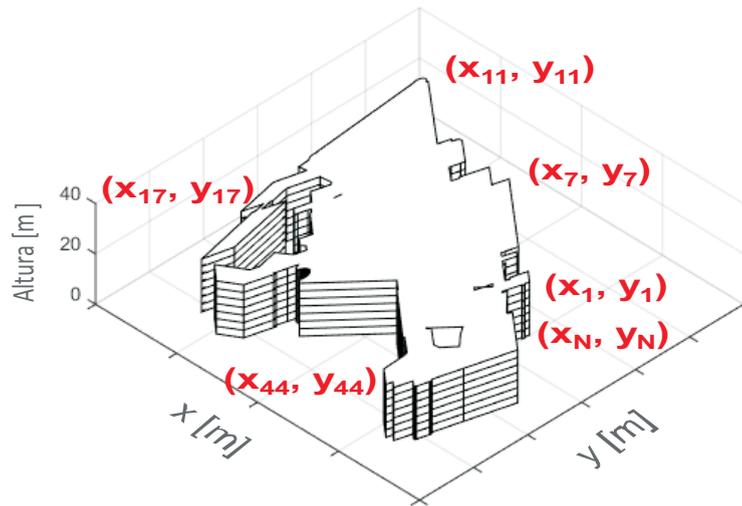


FIGURA 3.6: Ejemplo real de geometría de un edificio.

del producto, y el área de la planta puede calcularse fácilmente a partir de las coordenadas de la base del edificio con la fórmula del área de Gauss [113],

$$S_{planta} = \frac{1}{2} \left\| \sum_{j=1}^{n-1} x_j y_{j+1} + x_n y_1 - \sum_{j=1}^{n-1} x_{j+1} y_j - x_1 y_n \right\| \quad (3.3)$$

donde  $n$  es el número de vértices del edificio  $i$ , y  $x_j$  e  $y_j$  son las coordenadas del vértice  $j$ .

Una vez estimado el número de Radio Dots, se calcula el número de IRUs. En principio, puede usarse cualquiera de las dos topologías mostradas en las Fig. 3.3(a) y Fig. 3.3(b), que permiten un máximo de 6 o 12 IRUs por DU y 8 Radio Dots por IRU. En la práctica, la configuración en estrella es la configuración típica, y es, por tanto, la considerada en este estudio desde este punto.

### 3.3.2. Agrupamiento

Una vez estimado el número de IRUs por edificio en la etapa de dimensionado, el algoritmo de agrupamiento agrupa IRUs en DUs. La salida de este paso de agrupamiento (o *clusterización*) es la asignación de cada una de las IRUs del escenario a una DU. Para simplificar el cableado, dicha asignación se realiza a nivel de edificio, de forma que todas las IRUs de un mismo edificio deben asignarse a la

misma DU (aunque ésta esté en otro edificio). Así, la asignación de IRU a DU se realiza con resolución de edificio.

La agrupación de edificios en DUs puede formularse con un modelo de programación lineal entera (*Integer Linear Programming*, ILP) de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } C_{\text{coste}T} = \sum_{i=1}^{N_b} C_{\text{coste}}(i) = \sum_{i=1}^{N_b} (K_{DU}X_{ii} + \sum_{\forall j \neq i} K_{\text{fibra}}d_{ij}X_{ij}X_{jj}) \quad (3.4)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{j=1}^{N_b} X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_b} \omega_i X_{ij} \leq B_{aw}X_{jj} \quad \forall j. \quad (3.6)$$

La Eq. (3.4) describe el objetivo del proceso agrupamiento, que es minimizar el coste total de la instalación. Dicho coste consta de dos términos, que reflejan el coste de los equipos (DUs) y el coste de cableado (fibra), respectivamente.  $N_b$  es el número de edificios en el área bajo estudio,  $K_{DU}$  y  $K_{\text{fibra}}$  son los costes de una DU y los costes de la conexión de fibra por unidad de distancia (metros), respectivamente, y  $d_{ij}$  es la distancia en metros entre los edificios  $i$  y  $j$ . Esta distancia representa la distancia entre el centro de los edificios, ya que no se considera el cableado interior del edificio, porque las distancias suelen ser pequeñas y, en la mayoría de los casos, se utiliza la propia infraestructura de cableado estructurado del edificio.  $X_{ij}$  representa las variables binarias de decisión que definen la asignación de las IRUs de un edificio  $i$  a una DU situada en el edificio  $j$ , de manera que

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si las IRUs del edificio } i \text{ se conectan a una DU del edificio } j, \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (3.7)$$

y

$$X_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{si existe una DU propia en el edificio } i, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (3.8)$$

La primera restricción en (3.5) fuerza a que cada edificio deba asignarse a una única DU (condición denominada de *single homing*). La segunda restricción (3.6) refleja la limitación del equipo, que impide que no puedan conectarse más de  $B_{aw}$  IRUs a la misma DU.

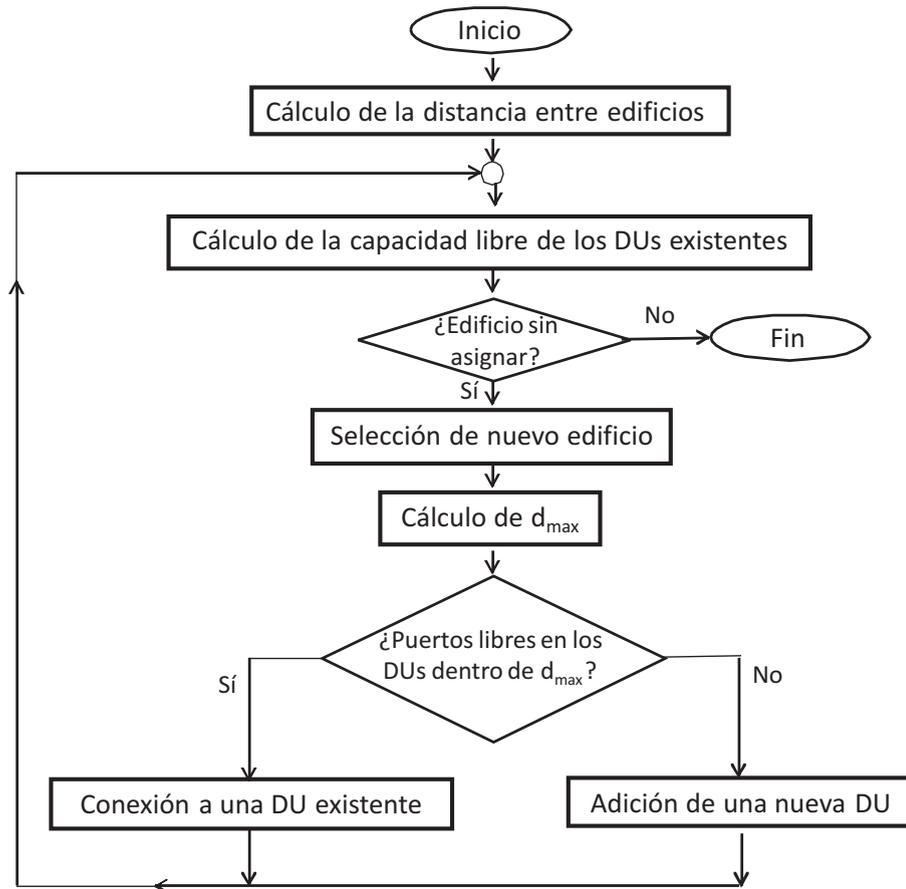


FIGURA 3.7: Diagrama de flujo del algoritmo de agrupamiento.

Es importante destacar que algunas de las variables de decisión,  $X_{ii}$  y  $X_{ij}$ , están prefijadas, ya que pueden haberse desplegado ya algunos emplazamientos en la red. Algunos de ellos podrían tener su propia DU (es decir,  $X_{ii} = 1$ ), mientras otras no (es decir,  $X_{ii} = 0$  y  $X_{ij} = 1$  para varias  $j$ ). La variable  $\omega_i$  refleja el número de IRUs necesarios en el edificio  $i$  (estimado mediante el algoritmo de dimensionado) y  $B_{aw}$  es el número máximo de conexiones disponibles para IRUs en una DU, dato que se obtiene de las restricciones suministradas por el fabricante.

Por razones computacionales, el problema de optimización combinatoria formulado en (3.4)-(3.6) se resuelve por métodos heurísticos. En la Fig. 3.7, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de agrupamiento. El algoritmo consta de un lazo principal que recorre secuencialmente todos los nuevos emplazamientos (edificios) candidatos con IRUs por asignar. Para cada emplazamiento candidato, el algoritmo comprueba si existe alguna DU con suficientes puertos libres en edificios adyacentes  $j$  dentro de una distancia,  $d_{max}$ , desde el emplazamiento bajo estudio. Esta distancia  $d_{max}$  es el mínimo entre dos distancias, la distancia máxima que

puede cubrir la interfaz de fibra CPRI debido a las limitaciones físicas,  $d_{maxCPRI}$ , y la distancia a la cual el coste del cableado es mayor que el coste de instalar una nueva DU. Esta última distancia depende de la relación entre el coste del equipo,  $K_{DU}$ , y el coste de cableado por unidad de distancia,  $K_{fibra}$ , de forma que

$$d_{max} = \min(d_{maxCPRI}, K_{DU}/K_{fibra}) . \quad (3.9)$$

Si la distancia entre el edificio candidato  $i$  y alguno de los edificios colindantes  $j$  es lo suficientemente pequeña, y éste edificio tiene alguna DU con capacidad libre, el nuevo emplazamiento no requiere una DU, ya que es más rentable asignar sus IRUs a una DU de los edificios de alrededor con capacidad libre suficiente, que introducir una nueva DU. Obviamente, si existen varios edificios cercanos con capacidad libre, la conexión se realiza al más próximo, para minimizar los costes de cableado. Así, el coste asociado se debe a la implementación de una nueva conexión de fibra, evitando la instalación de una nueva DU. Por el contrario, si no existen edificios cercanos con DUs con suficiente capacidad libre, o el coste asociado al cableado es más caro que colocar una nueva DU, el emplazamiento candidato necesita una nueva DU. En este caso, el coste es el asociado al de implementar una nueva DU.

Las condiciones anteriores de asignación óptima de DUs se pueden formular diciendo que

$$X_{ii} = \begin{cases} 0 & \text{si } d_{ij} \leq d_{max} \text{ y } \sum_{i=1}^{N_b} \omega_i X_{ij} \leq B_{aw} X_{jj} \text{ para algún } j , \\ 1 & \text{en otro caso ,} \end{cases} \quad (3.10)$$

y

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} \leq d_{max} \text{ y } \underset{j}{\operatorname{argmin}}\{d_{ij} \mid \sum_{i=1}^{N_b} \omega_i X_{ij} \leq B_{aw} X_{jj}\} , \\ 0 & \text{en otro caso ,} \end{cases} \quad (3.11)$$

resultando en un coste de emplazamiento

$$C_{coste}(i) = \begin{cases} K_{DU} & \text{si } X_{ii} = 1 \\ K_{fibra} * d_{ij} & \text{si } X_{ii} = 0 \text{ y } \underset{j}{\operatorname{argmin}}\{d_{ij} \mid \sum_{i=1}^{N_b} \omega_i X_{ij} \leq B_{aw} X_{jj}\} . \end{cases} \quad (3.12)$$

En (3.11)-(3.12), la condición  $\underset{j}{\operatorname{argmax}} d_{ij}$  asegura que la conexión se realiza al edificio más cercano con capacidad suficiente. Conviene matizar que, en la práctica,

al coste de las DUs debe añadirse el coste de los Radio Dots y las IRUs. Este coste adicional no depende del resultado del agrupamiento, siendo un término constante en la función objetivo a minimizar, y, por ello, se ha descartado de la formulación del problema.

### 3.3.3. Ordenación de emplazamientos candidatos interior

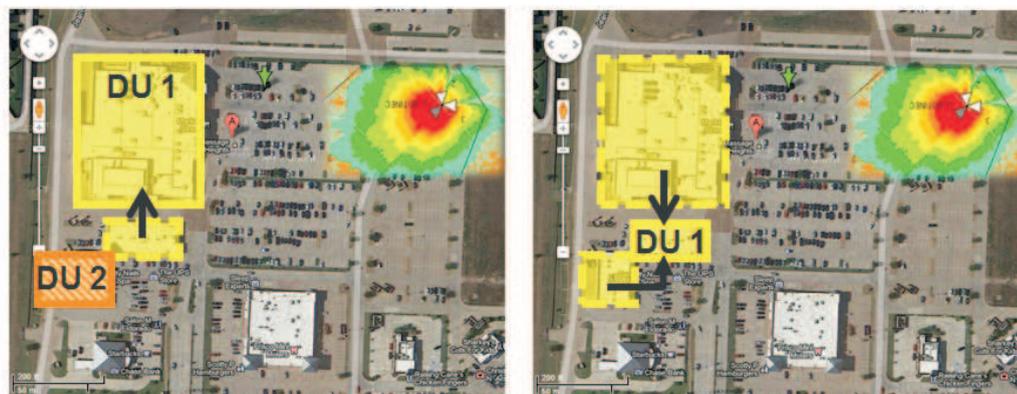
El último paso del algoritmo es la selección del siguiente emplazamiento a desplegar, para lo que deben ordenarse los emplazamientos candidatos en términos del beneficio esperado. Para ello, debe evaluarse el compromiso entre ganancia de cobertura/capacidad frente a coste de cada uno de los futuros emplazamientos. Si solo se tiene en cuenta el coste monetario, un algoritmo de selección de emplazamiento voraz favorecerá emplazamientos candidatos cercanos a los ya existentes, ya que serán los más baratos de implementar. Sin embargo, en un caso real, las ganancias de cobertura y capacidad también deben tenerse en cuenta. Con este propósito, se define una cifra de mérito para ordenar los emplazamientos candidatos, según

$$FoM(i) = \omega_{cov} * C_{cov}(i) + \omega_{cap} * C_{cap}(i) - \omega_{cost} * C_{coste}(i) , \quad (3.13)$$

donde  $C_{cov}$  y  $C_{cap}$  son las ganancias de cobertura y capacidad obtenidas si se añaden los emplazamientos de interiores candidatos, y  $C_{coste}$  es el coste de implementación, incluyendo todos los equipos radio y de la red de retorno. Los parámetros  $\omega_{cov}$ ,  $\omega_{cap}$  y  $\omega_{cost}$  son pesos definidos para priorizar los distintos criterios de rendimiento según la política del operador. Una vez evaluados todos los emplazamientos candidatos, se selecciona en cada paso el emplazamiento con la mayor  $FoM$ .

### 3.3.4. Reagrupamiento

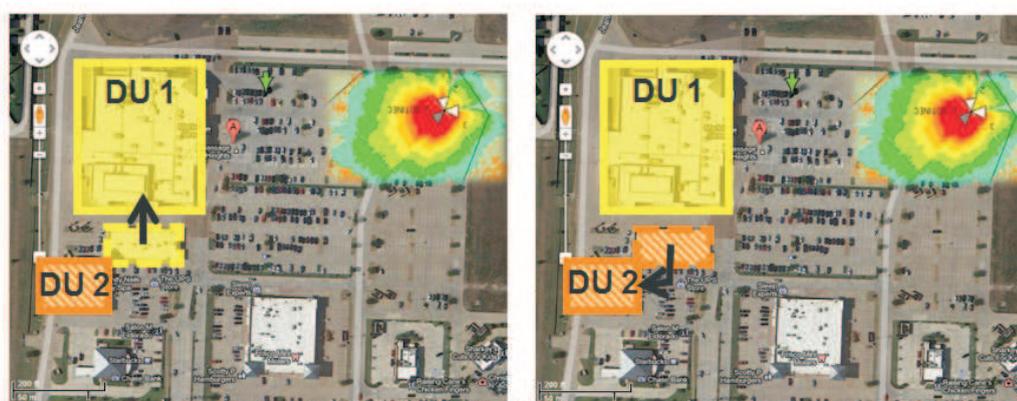
Como se ha comentado, el algoritmo de selección de emplazamiento trabaja iterativamente seleccionando el siguiente mejor emplazamiento candidato. El número de iteraciones, que determina el tamaño del conjunto de emplazamientos seleccionados, depende del presupuesto disponible.



Antes

Después

(a) Reubicación de una DU.



Antes

Después

(b) Reasignación de un edificio a una nueva DU.

FIGURA 3.8: Casos de reagrupamiento.

Conforme se seleccionan nuevos emplazamientos candidatos, aparecen nuevas DUs. Por ello, después de añadir un emplazamiento con una nueva DU, un algoritmo de reagrupamiento comprueba si:

- a) la nueva DU puede evitarse recolocando DUs cercanas, y
- b) si IRUs que han sido asignadas anteriormente en los alrededores pueden reasignarse a la nueva DU para reducir el coste de cableado.

Si ambas opciones son posibles, se selecciona la de menor coste.

La Fig. 3.8 (a)-(b) muestran un ejemplo real de ambos casos. En ambos ejemplos, se considera la planificación de 3 edificios (a la izquierda de las imágenes) que se encuentran dentro del área de servicio de un emplazamiento macrocelular trisectorial (en la esquina superior derecha de las imágenes). El primer caso, mostrado

en la Fig. 3.8 (a), refleja la reubicación de una DU que había sido previamente planeada para un edificio. La parte izquierda de la figura representa la situación antes del reagrupamiento, donde un edificio tiene su propia DU (DU1) y se acaba de seleccionar un edificio candidato que necesita una nueva DU (DU2), porque la distancia a los edificios cercanos con DU es demasiado grande. Un análisis más profundo muestra que la inclusión de la DU2 puede evitarse si la DU1 se recoloca en el edificio cercano al nuevo edificio seleccionado. Así, los tres edificios pueden servirse con una única DU. El segundo caso, mostrado en la Fig. 3.8 (b), refleja la reasignación de un edificio a una nueva DU. La parte izquierda de la figura representa la situación antes de la reasignación, donde un edificio tiene su propia DU (DU1) y otro edificio candidato está conectado a esa DU. Cuando aparece una nueva DU (DU2) como resultado de seleccionar un nuevo emplazamiento candidato, se comprueban los emplazamientos de alrededor en busca de conexiones disponibles más cortas (y, por lo tanto, más baratas) a la nueva DU. La parte derecha de la figura representa la situación donde un edificio ha sido reasignado a la nueva DU después del reagrupamiento.

## 3.4. Análisis de rendimiento

En esta sección, se realizan diversos experimentos para evaluar los algoritmos descritos anteriormente. Para ello, se utiliza un escenario urbano construido a partir de datos de una red LTE heterogénea real. Como en otros capítulos, se presenta primero la metodología experimental y los resultados se comentan posteriormente.

### 3.4.1. Metodología experimental

El algoritmo de selección de emplazamientos de interior propuesto se incluye en un simulador estático LTE de nivel de sistema similar al que suelen incluir las herramientas comerciales de planificación celular. La explicación del simulador se incluye en el apéndice B.

El escenario simulado cubre un área geográfica de  $30 \text{ km}^2$ , que incluye emplazamientos trisectoriales con 176 macroceldas. Dentro de este escenario, se selecciona un área más pequeña, de  $12 \text{ km}^2$ , con 449 edificios y 25 macroceldas para el análisis. La Fig. 3.9 muestra el área seleccionada, con los edificios candidatos para

incluir de un emplazamiento de interior (una IBS). Obsérvese que cada polígono constituye un emplazamiento candidato, y de ahí la necesidad de disponer de un algoritmo automático de evaluación y selección de emplazamientos. La Fig. 3.9 (a) muestra el mapa del área en dos dimensiones, con los edificios y macroceldas cercanas. La Fig. 3.9 (b) muestra un zoom en la zona de los edificios en 2D y la Fig. 3.9 (c) muestra la altura de los edificios, de donde se deduce el número de plantas por edificio, necesario para dimensionar el número de equipos necesarios por edificio.

En el simulador, el escenario se divide en una rejilla de puntos, que representan las posiciones potenciales de los usuarios. Las pérdidas de propagación de cada estación base macrocelular se calculan a partir de una variante del modelo de Okumura-Hata [114], conocida como modelo Ericsson 9999 [115], para una frecuencia de operación de 2600 MHz y un escenario urbano. Para identificar la posición de los emplazamientos candidatos de interior, se utilizan datos geográficos de edificios reales. En los puntos dentro de los edificios, se asumen unas pérdidas añadidas de penetración por muros de 10 dB. A posteriori, se comprueba que más del 59 % de las posiciones potenciales de usuario caen dentro de un edificio, por la alta densidad de edificios de la zona. Se considera igualmente un desvanecimiento lento log-normal. Las áreas de servicio de las macroceldas se precálculan a partir de la matriz de propagación, mientras que el área de servicio de las celdas de interior se toma directamente de la forma del edificio.

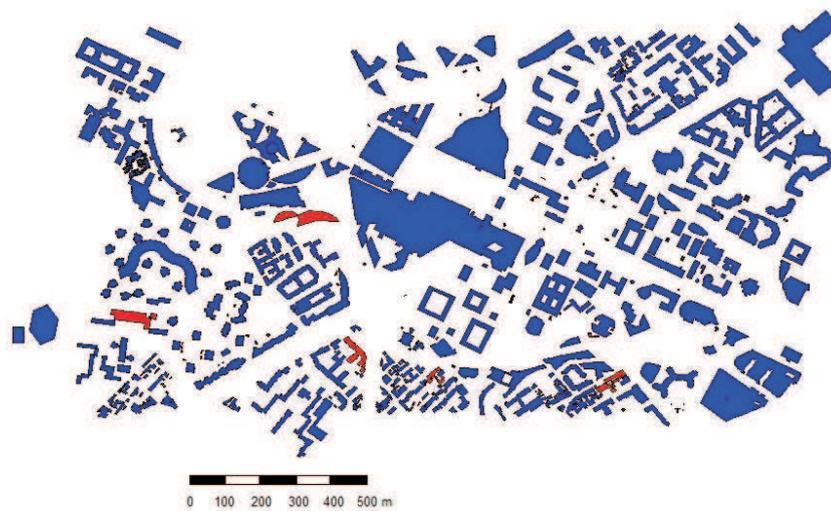
Se asume que, dentro de los edificios, se satisfacen los requisitos de cobertura y capacidad con un número específico de Radio Dots, calculado con el algoritmo de dimensionamiento. Así, no es necesario incluir un modelo de propagación de interiores. Para evitar efectos de borde, solo se consideran aquellos puntos con un valor mínimo de RSRP.

La distribución espacial de tráfico se obtiene del ratio medio de utilización de PRBs y de las medidas de *Timing Advance* (TA), recogidas por celda durante la hora cargada de la zona. La Tabla 3.1 resume los principales parámetros del simulador.

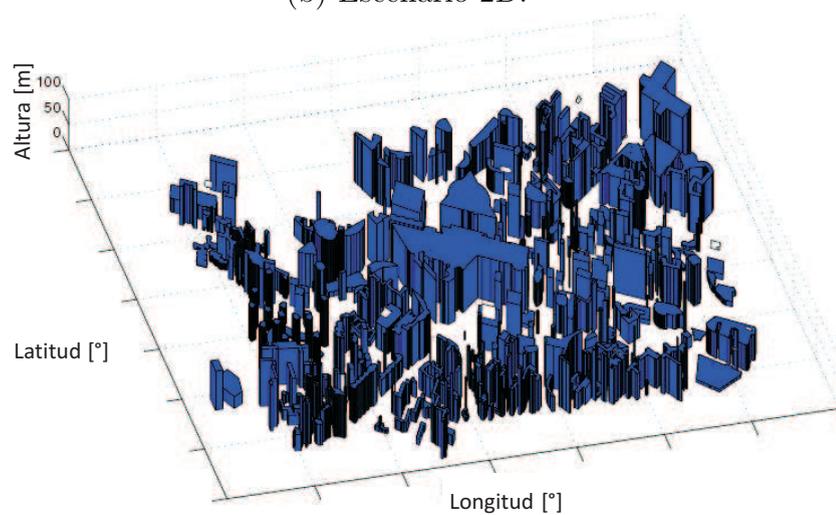
Con la herramienta de simulación, se estiman las ganancias de cobertura y capacidad de añadir una IBS para cada edificio. La ganancia de cobertura,  $C_{cov}$ , se define como el conjunto de píxeles dentro del edificio que no estaban cubiertos



(a) Escenario 2D con celdas macro.



(b) Escenario 2D.



(c) Altura de los edificios.

FIGURA 3.9: Escenario urbano.

TABLA 3.1: Parámetros de simulación.

Tipo de simulador	Nivel de sistema, estático (basado en rejilla)
Enlace	Descendente
Resolución de la rejilla	20 m
Distribución espacial del tráfico	Irregular, basado en el ratio de utilización del PRB y medidas de TA reales Utilización media de PRB de la red = 31 %
Frecuencia	2600 MHz
Ancho de banda del sistema	10 MHz (50 PRBs)
Modelo de propagación	Exterior: $PL = A - 13.82 * \log_{10}(h_{BS}[m]) + (B - 6.55 * \log_{10}(h_{BS}[m])) * \log_{10}(d[\text{km}])$ [dB] $A = 157.5, B = 44.9, h_{BS}[m] = 30$ Desvanecimiento lento lognormal, std. 8 dB Distancia de correlación 20 m Exterior-interior: 10 dB de pérdidas de penetración
Modelo de antena	Configuración MIMO 2x2
Modelo de macrocelda	$P_{tx} = 46$ dBm, $G_{max} = 13$ dB
Modelo de UE	Altura de antena 1.5 m Suelo de ruido -114.45 dBm

adecuadamente antes (y que formaban, por tanto, un hueco de cobertura) y podrían servirse con el nuevo emplazamiento de interior. Por simplicidad, se asume aquí que todos los puntos de la rejilla que caen dentro de un edificio experimentan un servicio adecuado con una solución de interior, y la solución interior no tiene ningún impacto en la interferencia recibida por las macroceldas cercanas debido al aislamiento de los muros. De manera similar, la ganancia de capacidad de cada edificio,  $C_{cap}$ , se estima como el tráfico de las macroceldas cercanas que se podría capturar por el nuevo emplazamiento. Este indicador cuantifica el alivio de tráfico en las macroceldas que se consigue con la solución de interior.

El algoritmo de selección de emplazamiento se prueba en el mismo escenario con 4 versiones diferentes de agrupamiento, de complejidad creciente:

- a) La solución *base* que considera 1 DU por edificio (es decir, sin agrupamiento). Esta solución corresponde al caso peor de coste de despliegue por edificio, que se toma como referencia de comparación.
- b) El algoritmo heurístico de *agrupamiento* propuesto sin reagrupamiento (es decir, una vez que un edificio se asigna a una DU, éste no puede reasignarse cuando se seleccionen emplazamientos colindantes).
- c) El algoritmo heurístico propuesto, que incluye tanto *agrupamiento* como *reagrupamiento*, donde la asignación puede modificarse después de la selección de cada nuevo emplazamiento.

- d) La solución *exacta* (es decir, óptima), obtenida resolviendo el modelo ILP descrito en (3.4)-(3.6) con el paquete de optimización entera Gurobi [116]. En este último caso, se asume que, a diferencia de los otros métodos heurísticos, el conjunto final de emplazamientos a añadir es conocido (que está formado por todos los edificios de la zona), lo que permite construir la solución óptima final sin estar condicionado por las soluciones intermedias.

Todos los métodos se evalúan primero considerando solo el coste monetario (es decir,  $\omega_{cov} = 0$ ,  $\omega_{cap} = 0$  y  $\omega_{cost} = 1$ , de forma que  $FoM = C_{coste}$ ). Esta evaluación puede hacerse sin el simulador, ya que requiere de cálculos de cobertura ni de capacidad. Posteriormente, todos los métodos se incluyen en el simulador para realizar las estimaciones de cobertura y capacidad a la hora de seleccionar los mejores candidatos. Recuérdese que dichas estimaciones únicamente pretenden evaluar el número de puntos de interior sin cobertura por parte de las macroceldas, que podrían ser cubiertos por las celdas de interior. Para facilitar el análisis, todos los pesos de la cifra de mérito se fijan al mismo valor (es decir,  $\omega_{cov} = \omega_{cap} = \omega_{cost} = 1$ ). Así, se evalúa el impacto de otros criterios (cobertura y capacidad) en la selección de emplazamientos.

En un caso real, el presupuesto disponible es finito, y el objetivo final sería encontrar la lista de emplazamientos que maximiza la cifra de mérito de cobertura, capacidad y coste. Como el objetivo de este trabajo es el método de agrupamiento, el algoritmo de selección de emplazamiento se ejecuta en todos los casos hasta que todos los edificios candidatos en el escenario (449) se han incluido. Así, el principal indicador de rendimiento para evaluar los métodos de agrupamiento es el coste monetario total,  $C_{coste}$ , ya que la solución final obtenida por todos los métodos incluye todos los emplazamientos de interior del escenario. Para facilitar la comparación, el coste de cada solución se normaliza con respecto al método de referencia (solución base sin agrupamiento). Un análisis más exhaustivo muestra que, una vez incluidos todos los emplazamientos de interior del escenario, el porcentaje de puntos con buena cobertura se incrementa de un 92% a un 96%, y el tráfico de hora cargada en las macroceldas se reduce de un 69% a un 58%.

### 3.4.2. Análisis de resultados

En un primer experimento, no se considera ni la ganancia de cobertura ni la de capacidad en  $FoM$  para la selección del siguiente emplazamiento. La Fig. 3.10

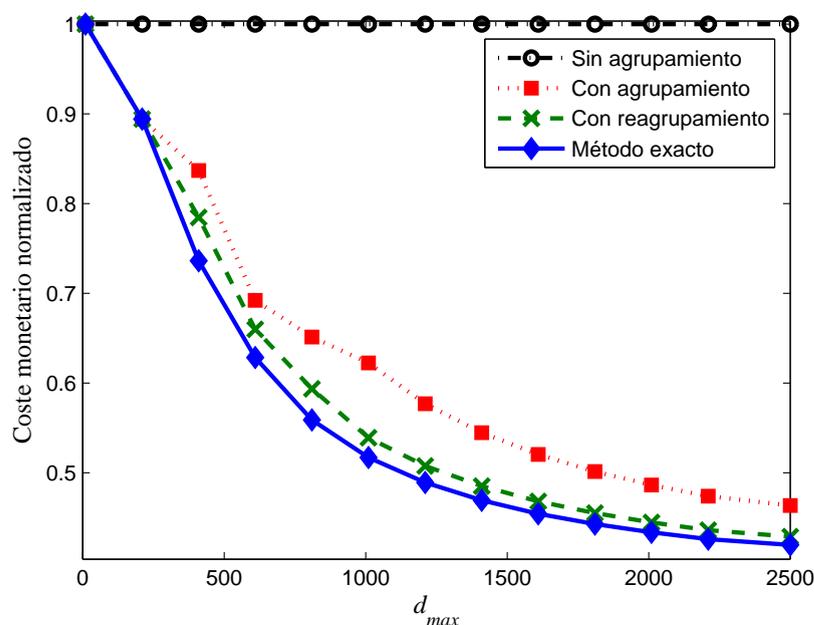


FIGURA 3.10: Comparativa de métodos (solo criterio monetario).

muestra el coste normalizado de incluir todos los emplazamientos de interior obtenido por los diferentes algoritmos para diferentes valores de la restricción de distancia,  $d_{max}$ .

Recuérdese que, de la ecuación (3.9),  $d_{max} = K_{DU}/K_{fibra}$  si no hay limitación física para la interfaz IRU-DU. Como se observa en la figura, los algoritmos de agrupamiento y reagrupamiento propuestos reducen el coste monetario considerablemente, si se compara con la solución de referencia (sin reagrupamiento), en la que existe 1 DU por IBS. En el caso de algoritmo con reagrupamiento, se logra un coste final cercano a la solución óptima. La principal diferencia entre estos métodos es que, mientras que en el método con reagrupamiento, las acciones de reagrupamiento se van realizando de forma progresiva conforme se introducen nuevos emplazamientos, en el método exacto, las acciones de reagrupamiento se realizan sabiendo que se introducen todos los emplazamientos del escenario. También puede observarse que la reducción total del coste depende fuertemente del valor de  $d_{max}$ . Concretamente, la reducción de coste alcanzada por el algoritmo con reagrupamiento es de un 58 ( $= 100 - 42$ )% en el caso de  $d_{max}=2500$ .

Cuando solo se considera el coste monetario, y se obvian los criterios radio, los emplazamientos seleccionados para un presupuesto dado se añaden uno próximo al otro, ya que es la opción más barata. De esta manera, el resultado está

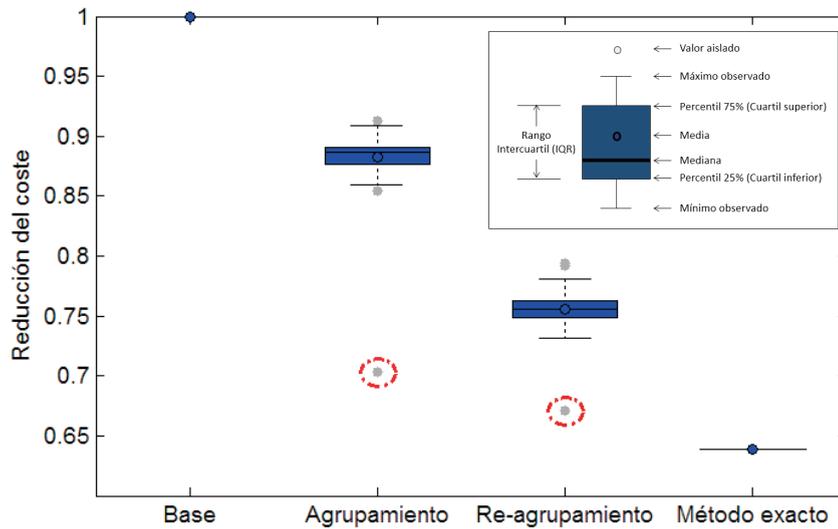


FIGURA 3.11: Sensibilidad del coste al orden de selección de emplazamientos en distintos métodos.

muy condicionado por el primer emplazamiento candidato seleccionado. Sin embargo, cuando se consideran también los factores de cobertura y capacidad, los emplazamientos se seleccionan de localizaciones distantes en la red, lo que influye en el funcionamiento de los algoritmos de agrupamiento. Para comprobar el impacto del orden en el que se introducen los emplazamientos en los algoritmos de (re)agrupamiento, en un segundo experimento, los métodos de agrupamiento se prueban seleccionando los nuevos candidatos de manera aleatoria. Para simplificar el análisis,  $d_{max}$  se fija a un valor de 600 m. La Fig. 3.11 representa un diagrama de caja [117] con los cuartiles de los costes normalizados obtenidos por cada método para 100 ordenaciones aleatorias diferentes de los 449 edificios en el escenario.

De la figura, se puede deducir que el orden de selección de los emplazamientos afecta al rendimiento del agrupamiento, dada la dispersión de valores de costes que se produce en los métodos que incluyen agrupamiento. Sin embargo, las diferencias de coste son pequeñas cuando se comparan con la reducción media del coste obtenida con los algoritmos de agrupamiento y reagrupamiento. Solo unos pocos casos (que se consideran valores atípicos, remarcados con un círculo en la figura) muestran una gran desviación, con un coste normalizado mucho más bajo (lo cual es bueno). Como se esperaba, estos casos corresponden a una ordenación parecida al orden en el que se seleccionan los emplazamientos únicamente considerando el coste monetario.

En el siguiente experimento, se evalúa el algoritmo de selección de emplazamiento completo, incluyendo los factores de cobertura y capacidad mostrados en (3.13). El objetivo es cuantificar en un caso real el impacto de los criterios de capacidad y cobertura en el rendimiento del agrupamiento, y viceversa. Para facilitar el análisis, todos los pesos en (3.13) se fijan al mismo valor. La Fig. 3.12 representa el coste monetario normalizado con cada método para diferentes valores de  $d_{max}$ . Como se esperaba, se observa que los métodos sin agrupamiento y exacto consiguen los mismos rendimientos que en el primer experimento, mostrado en la Fig. 3.10. Debe recordarse que, en el método sin agrupamiento, se utiliza 1 DU por edificio (es decir, el coste monetario no cambia), y en el método exacto, no se tienen en cuenta los factores de cobertura y capacidad en (3.4) para determinar los costes. En contraste, los métodos de agrupamiento y reagrupamiento consiguen peores rendimientos que en el caso anterior, obteniendo mayores costes monetarios. La diferencia se debe al orden diferente en el que se seleccionan los nuevos candidatos cuando se tienen en cuenta además las ganancias de capacidad y cobertura ofrecidas por cada emplazamiento de interior. Así, la cobertura de red y la capacidad mejoran a costa de incrementar los costes de implementación. Y lo que es más importante, comparando la Fig. 3.12 y la Fig. 3.10, se observa que la inclusión de los criterios de capacidad y cobertura tienen un impacto sensiblemente mayor en el método básico de agrupamiento que en el método que incluye reagrupamiento. Específicamente, con pesos iguales para cobertura, capacidad y coste monetario, la inclusión de los algoritmos de reagrupamiento reduce los costes de implementación de la red hasta en un 49 % en un escenario real, frente a solo un 35 % con el método de agrupamiento básico. De estos resultados, puede concluirse que la necesidad del algoritmo de reagrupamiento es más fuerte en el caso de la red real, donde deben considerarse tanto el coste monetario como el rendimiento de la red radio.

Merece la pena llamar la atención sobre el hecho de que los algoritmos propuestos de (re)agrupamiento tienen también un impacto positivo en el rendimiento de la red radio cuando existen restricciones de presupuesto, ya que la reducción del coste de despliegue obtenida con el (re)agrupamiento permite dotar más edificios con celdas pequeñas, mejorando así la cobertura y la capacidad del sistema. Para comprobar este impacto positivo en las ganancias de cobertura y capacidad, se realiza un último experimento, donde se fija un presupuesto máximo, equivalente a la introducción del mismo número de DUs que edificios a cubrir. En la solución sin agrupamiento, dicho presupuesto permite cubrir estos edificios. El objetivo del

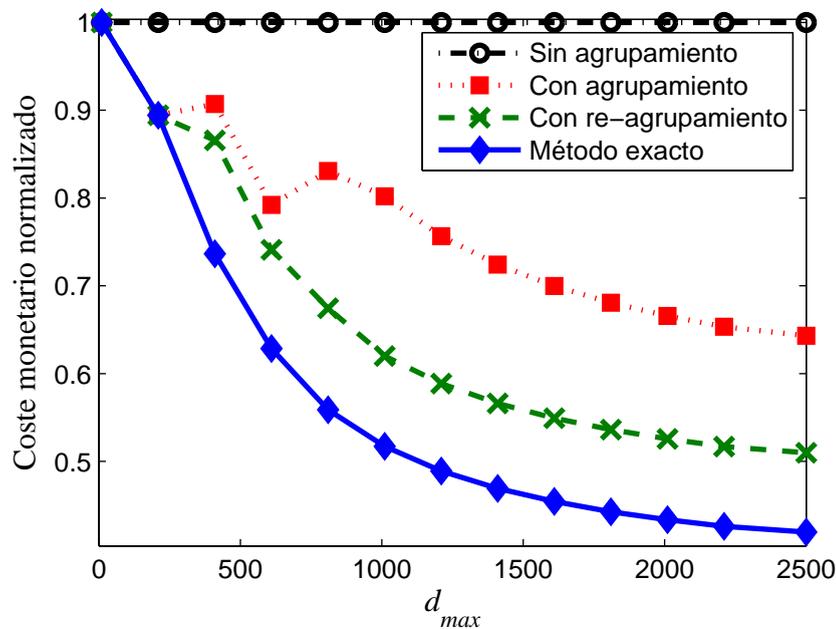


FIGURA 3.12: Comparativa de métodos (con todos los criterios).

experimento es comprobar cómo se puede alcanzar la misma ganancia en cobertura y capacidad reduciendo considerablemente el equipamiento y, por lo tanto, el coste monetario. La Fig. 3.13 muestra cómo se incrementa la ganancia de cobertura y capacidad con la introducción de cada DU para los tres métodos evaluados (sin agrupamiento, con agrupamiento y con reagrupamiento). Esta ganancia se mide en base al número de píxeles que se cubren en cobertura o capacidad con cada nueva DU introducida, normalizada con respecto al total de píxeles que se pueden mejorar, es decir, con respecto al total de píxeles que cubren el conjunto de edificios. Se observa cómo, para el algoritmo con agrupamiento, el número de DUs necesarias para obtener la misma ganancia de cobertura (e igualmente en capacidad) es 188, frente las 449 necesarias para el método de partida y 157 para el caso de utilizar el método con reagrupamiento. En la figura, se observa cómo los algoritmos de agrupamiento y reagrupamiento ofrecen rendimiento idéntico cuando el número de DUs es pequeño. Esto se debe a que, hasta que no se introduce un número suficientemente alto de IBSs en el escenario, no aparecen casos en los que se aproveche la capacidad de reagrupamiento.

El estudio se cierra con un análisis de la complejidad computacional de los métodos. Para ello, se ejecutan todos los métodos sobre el escenario de 449 edificios en un ordenador personal con un procesador de frecuencia de reloj de 2.6 GHz, 2 núcleos y 8 GB de RAM. Cuando solo se consideran costes monetarios, el algoritmo

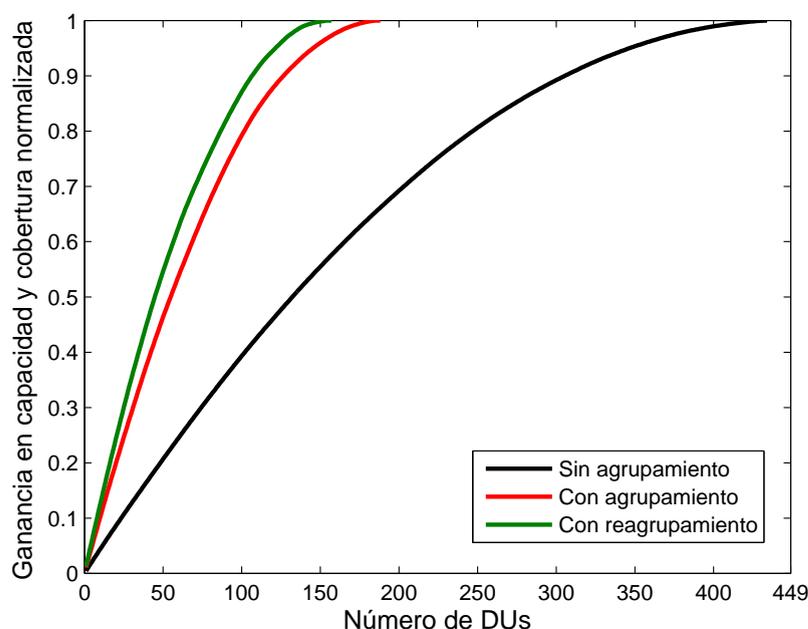


FIGURA 3.13: Impacto del agrupamiento en la ganancia de cobertura y capacidad.

heurístico de reagrupamiento propuesto tarda menos de 3 minutos en encontrar una solución cercana a la óptima para los 449 edificios. Por el contrario, la solución exacta, construida con Gurobi, tarda aproximadamente 2 horas.

### 3.5. Conclusiones

En este capítulo, se ha propuesto un nuevo método automático de selección de emplazamiento de interior para una herramienta de planificación de redes LTE heterogéneas. Como principal novedad, el método incluye un algoritmo de agrupamiento de edificios en unidades de procesamiento en banda base que permite minimizar los costes de despliegue. En una etapa inicial de dimensionado, el método estima el número requerido de equipos en cada edificio. En una segunda etapa, el algoritmo de agrupamiento busca la solución más barata agrupando edificios próximos en la misma DU. La solución así construida se refina con un algoritmo de reagrupamiento tras añadir cada nuevo emplazamiento, reduciendo aún más el coste de implementación.

El método completo de selección de emplazamientos se ha integrado en una herramienta de planificación radio basada en un simulador estático de nivel de

sistema. Con dicha herramienta, se ha comparado el método propuesto con la estrategia actual de asignar una unidad de procesado en base por edificio.

Las simulaciones presentadas muestran que, cuando se consideran criterios de cobertura, capacidad y costes monetarios al seleccionar los nuevos emplazamientos, la inclusión del algoritmo propuesto puede reducir el coste total de la red hasta en un 49 % en un escenario real.

De igual forma, para un presupuesto prefijado, el algoritmo de agrupamiento propuesto consigue mejorar la tasa de cobertura y reducir el tráfico de las macroceldas de manera mucho más eficiente que utilizando la estrategia actual, que utiliza una unidad de banda base por edificio. De esta forma, se incrementa el valor del despliegue masivo de celdas de interior.

Se prevé que algoritmos como los propuestos serán imprescindibles en un futuro no muy lejano, dado el auge de las redes celulares heterogéneas y el gran número de edificios existentes en los escenarios urbanos. En este sentido, es importante destacar que el método de selección de emplazamientos de interior propuesto no depende de la tecnología de acceso radio utilizada, y, por ello, es extensible a cualquier tipo de tecnología.



# Capítulo 4

## Conclusiones Finales

En este último capítulo, se resumen las principales conclusiones del trabajo. Primero se destacan las contribuciones originales de esta tesis. Después se describen posibles líneas de continuación del trabajo. Finalmente, se presenta la lista de publicaciones generadas durante el desarrollo de esta tesis.

### 4.1. Principales contribuciones

En los últimos años, el tamaño y la complejidad de las redes móviles ha aumentado de manera considerable. Estos cambios han hecho que la gestión de la red se convierta en uno de los principales cuellos de botella para el desarrollo de las redes móviles. Para afrontar este problema, las tareas de gestión se han ido automatizando paulatinamente, consiguiendo redes cada vez más autónomas y de mejor rendimiento.

En esta Tesis Doctoral, se han presentado diversos métodos de planificación automática de parámetros diseñados para redes LTE. Todos los métodos descritos son lo suficientemente sencillos y eficientes como para ser integrados en una herramienta de planificación comercial sin comprometer su eficiencia computacional. Con ellos, se pretende mejorar el rendimiento de la red, mejorar la calidad de servicio ofrecida al usuario y reducir el esfuerzo que suponen al operador las tareas de planificación de red.

Como se ha expuesto a lo largo del documento, el trabajo se ha dividido en dos grandes bloques, que son la planificación de identificadores de celda y la agrupación de emplazamientos de interior basados en celdas pequeñas en redes LTE. La descripción de las principales contribuciones que se presenta a continuación mantiene esta misma división.

#### **4.1.1. Planificación de identificadores de celda en LTE**

En esta Tesis, se ha abordado el problema de la asignación de PCIs a celdas en una red LTE. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

1. Como punto de partida, se ha realizado un trabajo exhaustivo de búsqueda y análisis de las técnicas empleadas hoy en día por los operadores para asignar identificadores físicos de celda. El análisis del estado de la investigación y la tecnología ha mostrado que los trabajos en este ámbito se han centrado hasta la fecha en la resolución de los problemas de colisión y confusión, y no se ha tenido en cuenta el impacto de la asignación de identificadores físicos de celda en las señales de referencia, tanto del enlace ascendente como descendente de LTE.
2. Además de un estudio de la tecnología LTE y las técnicas SON aplicadas a este problema, el trabajo ha incluido el análisis de planes de asignación de identificadores físicos de celda de redes reales. Dicho análisis ha requerido el estudio de la información suministrada por el fabricante, para posteriormente ser capaz de construir, consultar y manejar las bases de datos con los parámetros e indicadores de rendimiento de red, que han sido tareas importantes en el desarrollo de esta tesis.
3. Como parte de la formulación del problema, se ha modelado de forma analítica el impacto de la planificación de identificadores de celda en las señales de referencia del enlace descendente de LTE. Para ello, se ha realizado un modelo del canal compartido de datos (PDSCH) que permite estimar las tasas de transmisión alcanzables por el usuario según los distintos planes propuestos. Este modelo se ha integrado en un simulador dinámico de nivel de sistema, con el que se han llevado a cabo simulaciones considerando parámetros típicos de planificación, como el nivel de carga soportado, el tipo de

distribución espacial de tráfico o el tipo de servicio. Este análisis preliminar ha permitido evaluar el impacto de la asignación de identificadores de celda en la calidad del enlace descendente de LTE, e identificar las propiedades que debe cumplir un buen plan de asignación para maximizar la eficiencia espectral del sistema.

4. También como parte de la formulación del problema, se ha modelado de forma analítica el impacto de la planificación de identificadores de celda en las señales de referencia de demodulación del enlace ascendente de LTE. Para ello, se ha modelado en este caso la tasa de bloqueo del canal de control común (PUCCH) según distintas estrategias de planificación del PCI. Siguiendo los pasos del enlace descendente, se ha integrado el modelo desarrollado en un simulador estático de nivel de sistema y se han llevado a cabo simulaciones sobre un juego de datos real considerando distintos parámetros de planificación, algunos de ellos propios del enlace ascendente, como el tipo de esquema de control de potencia. Este análisis preliminar ha permitido evaluar el impacto de la asignación de identificadores físicos de celda en la calidad del enlace ascendente de LTE, y determinar las condiciones que debe cumplir un plan de asignación para garantizar un buen funcionamiento del enlace ascendente de LTE, y, en especial, del canal común de control.
5. Una vez obtenidos los requisitos que debe cumplir un plan de identificadores físicos de celda, se ha formulado y resuelto el problema de asignación subyacente mediante algoritmos de partición de grafos. Como principal novedad en la formulación, se han considerado de forma integrada los problemas de colisión-confusión de identificadores y las colisiones de las señales de referencia tanto en el enlace ascendente como descendente.
6. También como contribución original, se han adaptado algoritmos clásicos de partición de grafos para construir planes que eviten, en la medida de lo posible, los problemas de colisión-confusión de identificadores y colisión de señales de referencia del enlace ascendente y descendente. Estos algoritmos se han probado con una instancia del problema construida con datos de una red real.
7. Los resultados muestran que el algoritmo diseñado puede eliminar completamente los problemas de colisión y confusión, a la vez que reduce las colisiones de señales de referencia del enlace descendente hasta un 62 % y las del canal

del control del enlace ascendente hasta un 84 %, comparado con la solución actualmente implementada en la red.

8. Todos los algoritmos desarrollados en esta tesis han sido diseñados para que sean sencillos, facilitando así su implementación por los equipos de desarrollo y su validación por ingenieros de verificación. De igual forma, los algoritmos presentan baja carga computacional, lo que los hace especialmente indicados para herramientas comerciales de planificación, con las que se deben construir planes de PCI de grandes áreas geográficas. Por la misma razón, estos métodos se han diseñado de forma que sean fácilmente trasladables a otras tecnologías.

#### **4.1.2. Selección de emplazamientos de interior**

En esta tesis también se ha abordado el problema de la selección de emplazamientos de interior basados en celdas pequeñas, a realizar durante la fase de planificación nominal de una red LTE heterogénea. En este contexto, se ha prestado especial atención a la reducción de costes que puede obtenerse mediante el agrupamiento de varios emplazamientos en una misma unidad de procesado en banda base. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

1. Como punto de partida, se ha realizado un análisis profundo de las soluciones de interior basadas en celdas pequeñas y el problema de la selección de emplazamientos en redes celulares. El análisis del estado de la investigación y la tecnología ha mostrado que los trabajos en este ámbito solo cubren la selección de emplazamientos tradicionales, basados en macro/micro/picoceldas, donde la principal dificultad es estimar la mejora en cobertura y capacidad introducida por el nuevo emplazamiento. Sin embargo, en las nuevas redes heterogéneas, se plantea la necesidad de encontrar la arquitectura de red que reduzca el coste monetario asociado a la implementación.
2. Como estrategia de reducción del coste de inversión, se ha propuesto el agrupamiento de emplazamientos de interior de distintos edificios en la misma unidad de procesado en banda base, como medida para reducir el coste de la solución de interior.

3. Para encontrar la mejor estructura de red, se ha desarrollado un modelo analítico del problema, basado en un modelo de programación lineal entera, que permite relacionar los costes de implementación con el agrupamiento de recursos físicos en función de la distancia entre celdas. Con dicho modelo, se ha resuelto el problema por un método exacto a partir de la herramienta de optimización entera Gurobi.
4. Como alternativa, se ha propuesto un algoritmo heurístico de agrupamiento que puede integrarse en cualquier algoritmo de selección de emplazamientos de una herramienta de planificación de red. Este algoritmo es suficientemente simple y eficiente como para no degradar la eficiencia computacional del algoritmo de selección de emplazamiento completo.
5. El algoritmo desarrollado se ha evaluado con un conjunto de datos obtenidos a partir de un escenario de red LTE heterogénea real, que incluye emplazamientos de interior y de exterior, especificaciones del fabricante y restricciones del operador. Como herramienta de evaluación para estimar el beneficio en términos de cobertura y capacidad, se ha utilizado un simulador estático de nivel de sistema.
6. Las simulaciones presentadas muestran que, cuando se consideran criterios de cobertura, capacidad y costes monetarios al seleccionar los nuevos emplazamientos, la inclusión del algoritmo propuesto puede reducir el coste total de la red hasta la mitad en un escenario real.

## **4.2. Líneas Futuras**

En esta sección se esbozan las posibles líneas de investigación que se derivan del trabajo realizado en esta tesis.

### **4.2.1. Planificación de identificadores físicos de celda en LTE**

Para el problema de planificación automática de identificadores físicos de celda en LTE, se identifican las líneas futuras de trabajo presentadas a continuación.

1. Los métodos propuestos en esta tesis para la asignación de identificadores físicos de celda estiman el acoplamiento entre celdas mediante las estadísticas de traspaso. Para una estimación más precisa de dicho acoplamiento, utilizado en la construcción de los grafos de red, se podrían utilizar otros indicadores de red que reflejen mejor los niveles de señal recibidos de celdas vecinas. Una opción es la construcción de matrices de interferencia intercelda [118], construidas a partir de las medidas de señales piloto disponibles en las trazas de conexión [119]. La activación de estas medidas, de carácter periódico, no está exenta de problemas, al incrementar la carga de procesamiento de las estaciones base y el consumo de batería del terminal. Por este motivo, los operadores son reticentes a activar de forma continua este tipo de medidas. Aun así, la mayoría de herramientas de planificación hoy en día utilizan este tipo de medidas para calibrar sus modelos de propagación, interferencia y movilidad de usuario [108]. Igualmente, las herramientas de optimización de red más recientes se basan en contadores construidos a partir de trazas de conexión [108] [120] [121].
2. Los métodos desarrollados han sido concebidos para redes 4G. Como extensión lógica, se plantea la adaptación de los métodos para las futuras redes 5G [122]. Por un lado, se identifica la necesidad de considerar la problemática particular de las redes LTE heterogéneas con múltiples capas, que aparecerán como resultado del despliegue masivo de celdas pequeñas. En este contexto, se prevé la necesidad de dotar a los métodos de cierta capacidad de adaptación para hacer frente al mayor dinamismo de este tipo de escenarios, donde será frecuente el encendido/apagado, la reubicación e incluso del desplazamiento de las celdas pequeñas. Se intuye que los esquemas de asignación de identificadores distribuidos se adaptan mejor a este tipo de entornos cambiantes. Aun así, conviene precisar que, si bien los métodos distribuidos resultan más adecuados para realizar la primera asignación de identificador tras la puesta en funcionamiento de una celda por primera vez, siempre es conveniente realizar de forma periódica una reasignación de los identificadores de celda de toda la red utilizando para ello información global de todo el sistema. Por otra parte, en el camino hacia la 5G, cabe destacar el auge de las comunicaciones máquina a máquina (M2M) en el contexto de la Internet de las Cosas (IoT), donde la optimización del canal ascendente será imprescindible para el desarrollo de redes ultra robustas y de gran eficiencia energética. De ahí que el estudio del canal ascendente llevado a cabo en esta

tesis, e incluido en las restricciones de la planificación de PCI, sea de vital importancia en las redes venideras.

3. Por otra parte, los métodos propuestos se han validado mediante simulaciones y con juegos de datos reales obtenidos de la red. Aun así, sería interesante verificar su funcionamiento mediante pruebas de campo donde se modificase el plan de PCI de una red real. Éste es el paso lógico tras implementar los algoritmos en una herramienta de planificación comercial.
4. Como extensión del trabajo, se propone la adaptación de los métodos de coloración de grafos desarrollados en esta tesis a otros problemas de asignación de recursos con restricciones de proximidad, como la planificación de frecuencias en GSM [123], la asignación de códigos primarios de aleatorización en UMTS [124] o problemas similares en futuras tecnologías. En estos casos de uso, sería conveniente estudiar los problemas causados por el despliegue de redes celulares ultradensas.

#### **4.2.2. Selección de emplazamientos de interior en redes LTE heterogéneas**

Para el problema del agrupamiento de recursos en redes LTE con celdas pequeñas, se identifican las líneas futuras descritas a continuación.

1. Como ampliación de los experimentos realizados, se propone validar los algoritmos propuestos con simuladores que presenten un modelo de propagación más exacto. De esta forma, se espera cuantificar de forma más precisa el compromiso existente entre la ganancia de rendimiento obtenida y el coste del despliegue de celdas pequeñas en escenarios de interior y exterior.
2. De la misma forma, se plantea la validación de los mismos mediante pruebas en redes reales, una vez que el algoritmo ya está implementado en una herramienta de planificación comercial.
3. Igualmente, se propone aplicar las técnicas diseñadas a otros escenarios de red en los que sea posible compartir recursos o equipos físicos con limitaciones de distancia entre celdas y/o número de posibles conexiones en cada recurso. Este tipo de escenarios será cada vez más frecuente dada la jerarquía de

red a la que se tiende en las redes venideras, donde habrá que mantener conectados muchos equipos pequeños para dar respuesta a las tecnologías de IoT o M2M.

### 4.3. Lista de Publicaciones

A continuación se enumeran las publicaciones resultantes del trabajo realizado en esta Tesis.

#### Artículos

- (i) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, I. de la Bandera, N. Faour, "Analysis of the impact of PCI planning on downlink throughput performance in LTE", *Computer Networks*, vol. 76, no. 1, pp. 42-54, 2015.
- (ii) R. Acedo, M. Toril, S. Luna-Ramírez, C. Úbeda, M. J. Vera, "Automatic clustering algorithms for indoor site selection in LTE", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (Springer)*, 2016.
- (iii) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, C. Úbeda, "A PCI planning algorithm for reducing uplink and downlink reference signal collisions in LTE", *Computer Networks*, vol. 2017, no. 119, pp. 112-123, 2017.
- (iv) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, J.A. Fernández-Segovia, C. Úbeda, "Analysis of the influence of PCI planning on the Physical Uplink Control Channel in LTE", enviado a *Wireless Personal Communications*, 2016.

#### Conferencias y reuniones científicas

- (v) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, I. de la Bandera, "Analysis of the impact of PCI planning on throughput performance in LTE", COST IC1004 5<sup>th</sup>-meeting, Málaga, Febrero 2013.
- (vi) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, I. de la Bandera, "Análisis de la planificación de señales de referencia en LTE con tráfico no uniforme",

Actas de XXVIII Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2013), Santiago de Compostela (España), Septiembre 2013.

- (vii) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, "Técnicas de partición de grafos para la planificación de identificadores físicos de celda en LTE", Actas de XXIX Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2014), Valencia (España), Septiembre 2014.
- (viii) R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, C. Úbeda, M.J. Vera, "Automatic clustering algorithms for in-building solutions in LTE", COST IC1004 13<sup>th</sup>-meeting, Málaga, 5-7 Mayo 2015.

### **Otras publicaciones relacionadas con la tesis**

- (ix) A. Sánchez, R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, C. Úbeda, "A trace data-based approach for an accurate estimation of precise utilization maps in LTE", *Mobile Information Systems*, vol. 2017, 2017.
- (x) M. Toril, R. Acedo-Hernández, A. Sánchez, S. Luna-Ramírez, C. Úbeda, "Estimating spectral efficiency curves from connection traces in a live LTE network", *Mobile Information Systems*, vol. 2017.

La lista de publicaciones anterior puede relacionarse con el contenido de la memoria según se describe a continuación.

Los trabajos [(v)], [(vi)], [(i)], [(iv)], [(vii)], [(iii)] recogen el trabajo realizado en la asignación de identificadores físicos de celda en LTE, descrito en el Capítulo 2. En [(v)], se presenta el análisis preliminar del impacto de la planificación de identificadores físicos de celda en el enlace descendente de LTE. En [(vi)], se extiende el estudio anterior considerando diferentes distribuciones espaciales de la demanda de tráfico, uniforme o no uniforme, a través del escenario. En [(i)], se recoge el estudio completo de la influencia de la planificación de PCI en el rendimiento del canal PDSCH del enlace descendente. Por otra parte, en [(iv)], se presenta el estudio completo del impacto de la planificación de identificadores físicos de celda en el canal de control del enlace ascendente (PUCCH). En [(vii)], se presenta el algoritmo de partición de grafos utilizado para la planificación de identificadores de celda considerando los problemas de colisión y confusión y los problemas de colisiones de las señales de referencia en el enlace descendente. En [(iii)], se presenta

el algoritmo completo, considerando tanto los problemas de colisión y confusión como los de colisiones de las señales de referencia tanto en el enlace descendente como ascendente de LTE.

Los trabajos [(viii)] y [(ii)] recogen el trabajo realizado sobre el agrupamiento celdas pequeñas por emplazamientos, descrito en el Capítulo 3. En [(viii)], se presenta un análisis preliminar de la selección de emplazamientos de interior en redes LTE heterogéneas. En [(ii)], se presenta el estudio completo, con las simulaciones realizadas y las verificaciones sobre escenarios construidos a partir de redes LTE heterogéneas reales.

Todas estas contribuciones se han desarrollado en el marco del contrato de colaboración *Funciones SON para la planificación y optimización de redes* entre la Universidad de Málaga y la empresa Ericsson, financiado por la agencia IDEA de la Consejería de Ciencia, Innovación y Empresa de la Junta de Andalucía, y cofinanciado con fondos FEDER de la Unión Europea. Igualmente, parte de este trabajo ha sido financiado por el proyecto *Métodos de planificación y optimización de la calidad de experiencia en redes B4G* (TEC2015-69982-R) del Ministerio de Economía y Competitividad. Además, con [(v)] y [(viii)], se ha participado en la acción COST IC1004 (*Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments*).

# Apéndice A

## Simulador dinámico de nivel de sistema para LTE

En este apéndice se presenta el simulador dinámico de nivel de sistema desarrollado en Matlab para evaluar el impacto de la planificación de PCI en el enlace descendente de LTE. El simulador es una versión extendida del simulador descrito en [59]. Se presenta primero la estructura básica del simulador, para detallar después cada una de sus funcionalidades.

### A.1. Estructura básica

A continuación se describe el escenario de simulación y el diagrama de flujo de la simulación.

#### A.1.1. Escenario de simulación

La Fig. A.1 muestra el escenario de simulación implementado, formado por un número configurable de macroceldas hexagonales. En la figura se representa el caso de 19 emplazamientos trisectoriales distribuidos regularmente en el espacio. Para evitar efectos de borde, el simulador incorpora técnicas de envoltura (*wrap-around*), siguiendo las recomendaciones descritas en [125]. Esta técnica consiste en introducir réplicas del escenario original alrededor del mismo. Estas réplicas se

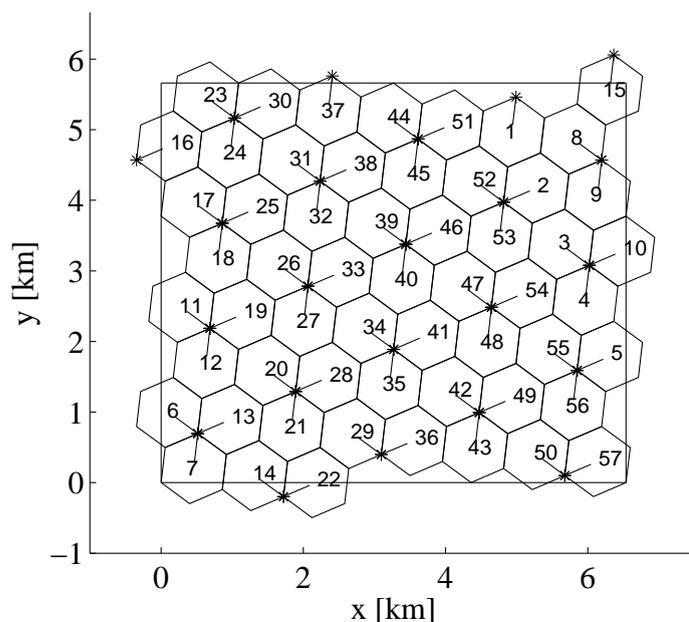


FIGURA A.1: Escenario de simulación.

comportan como fuentes de interferencia en los bordes del escenario original, pero no se tienen en cuenta en las estadísticas de rendimiento.

### A.1.2. Diagrama de flujo del simulador

En la Fig. A.2 se muestra un diagrama de flujo del simulador. En la etapa de configuración e inicialización, se definen los diferentes parámetros de cada una de las funcionalidades del simulador. En esta etapa también se genera la distribución espacial de usuarios, a cada uno de los cuales se le asocia una realización de canal OFDM.

La configuración de parámetros determina el escenario a simular, las características de los servicios y las principales características de la red. En la Tabla A.1 se presentan los parámetros configurables del simulador y un valor típico (usado en las simulaciones) de los mismos.

A continuación, se realizan los cálculos de propagación, para lo cual el simulador incluye un modelo de desvanecimiento lento y las realizaciones del canal OFDM que incluyen el desvanecimiento rápido. Como salida de esta fase, se obtiene el valor de la potencia recibida por cada usuario procedente de cada una de las distintas estaciones base. En la siguiente etapa se calcula la interferencia,

TABLA A.1: Parámetros de simulación.

Diseño celular	Rejilla hexagonal 57 celdas (3 emplazamientos * 19 sectores)
Dirección de transmisión	Enlace descendente
Frecuencia de portadora	2.0 GHz
Ancho de banda del sistema	5 MHz (25 PRBs)
Reutilización de frecuencia	1
Radio de celda	0.5 km
Distancia entre emplazamientos (ISD)	1.5 km
Modelo de propagación	Okumura-Hata con técnica de envoltura Desvanecimiento lento log-normal, $\sigma = 8$ dB, Distancia de correlación=20 m Desvanecimiento multicamino, modelo ETU
Modelo de movilidad	Dirección aleatoria, velocidad constante, 3 km/h
Modelo de servicio	VoIP: Llegada de tráfico distribución de Poisson, duración media de llamada: 120 s, 16 kbps <i>Full Buffer</i>
Modelo de estación base	Antena trisectorial, MIMO 2x2, $PIRE_{max}=43$ dBm
Planificador de recursos	Reparto proporcional Resolución: 1PRB
Distribución de carga	Distribución espacial uniforme y no uniforme
Modelo de llamadas caídas	Temporizador = 1 sec
Resolución temporal	100 TTI (100 ms)
Tiempo de red simulado	1 hora (por cada plan PCI)

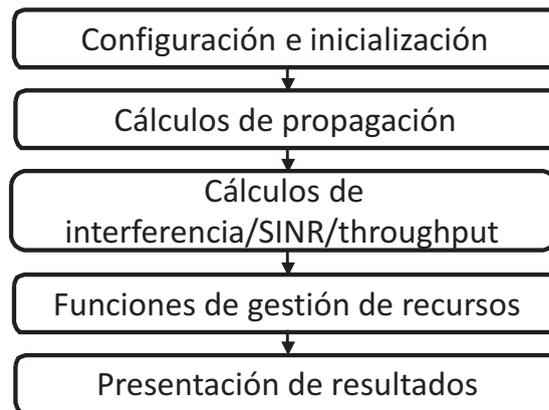


FIGURA A.2: Diagrama de flujo del simulador dinámico LTE.

la relación señal-ruido-interferencia, SINR, y la tasa de transmisión de datos, *throughput*, experimentada por cada usuario. La interferencia viene determinada por la potencia recibida procedente de otras estaciones base, distintas de la estación base servidora. Posteriormente, la etapa de gestión de recursos radio incluye funciones de nivel de red, como el control de admisión, el control de movilidad y la gestión de la calidad de servicio, a nivel de red, y de nivel de enlace, como la adaptación dinámica del enlace. Por último, el simulador muestra los principales estadísticos de rendimiento recogidos a lo largo de toda la simulación.

Sobre la figura anterior, se identifican los principales bloques del simulador, que son:

1. Distribución espacial de tráfico.

La distribución espacial de usuarios en el escenario puede ser uniforme o no uniforme. En el caso de una distribución uniforme, los usuarios se localizan en cualquier punto del escenario con la misma probabilidad. En caso de una distribución no uniforme, más próxima a la realidad, la distribución espacial de usuarios típica en áreas urbanas se describe con una distribución log-normal a nivel de celda [126].

2. Modelo de movilidad de usuario.

El modelo de movilidad implementado asume que cada usuario se desplaza con una trayectoria recta, pero con dirección aleatoria, que se mantiene durante toda la llamada. No se establece ninguna restricción en la dirección que puede tomar el usuario, pudiendo éste moverse libremente por el escenario. Por otra parte, el usuario se desplaza a una velocidad constante, con un valor configurable a 3, 50 ó 120 km/h. Este modelo también incluye la técnica de envoltura, de forma que, cuando un usuario llega al límite original del escenario, aparece en una posición opuesta del escenario.

3. Modelo de tráfico.

Para el modelo de tráfico, se consideran dos tipos de servicios: Servicio de voz sobre IP (*Voice over IP*, VoIP) y servicio *Best Effort* (similar a *Full Buffer*). El servicio VoIP se modela como una fuente generando paquetes de 40 bytes cada 20 ms [8], equivalente a una tasa de transmisión de 16 kbps durante el tiempo que dure la llamada. Como se explica más adelante, la asignación de recursos radio en el simulador se realiza en intervalos de 10 ms. Por esta razón, el servicio de voz se ha implementado como una fuente de datos que transmite paquetes de 20 bytes cada 10 ms. Para este servicio, se incluye un modelo de caída de llamadas, que refleja cuándo la red decide interrumpir el servicio si un usuario no recibe paquetes durante un intervalo de tiempo específico. La razón por la que no se le asignan recursos a un usuario puede ser porque la calidad de su conexión está por debajo de un cierto umbral, con lo que no se puede garantizar una mínima tasa de error, o porque no hay recursos disponibles suficientes en la celda servidora.

Por otra parte, el servicio *Full Buffer* se define como un usuario que tiene datos infinitos a transmitir. Por esta razón, un usuario *Full Buffer* siempre transmite con la tasa máxima disponible si se le asignan recursos radio. Este servicio permite evaluar el rendimiento de la red en términos de *throughput* máximo potencial. Formalmente, toda celda con un usuario FB presenta una carga del 100%, como consecuencia de la asunción de buffer completo. En este trabajo, para poder controlar el nivel de carga de la red, el servicio FB implementado en el simulador asume que el usuario se activa sólo durante un periodo de tiempo, esto es, el servicio tiene una duración limitada, durante la cual se asume que el usuario tiene información ilimitada que transmitir. Ajustando el tiempo de activación de los usuarios FB, es posible regular la carga del sistema. Posteriormente, es posible calcular el volumen de datos transmitido por cada usuario a partir del tiempo que el usuario ha estado activo y la tasa de transmisión experimentada.

## A.2. Nivel físico

En esta sección se describe el modelado de la capa física. Se define primero el modelo de propagación utilizado y, a continuación, el cálculo del desvanecimiento rápido.

### A.2.1. Pérdidas de trayecto y desvanecimiento lento

Los cálculos de propagación incluyen las pérdidas de trayecto, desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido. Las pérdidas de trayecto se calculan con el modelo de propagación COST 231, extensión del modelo de Okumura-Hata [64]. Este modelo estadístico es aplicable para un rango de frecuencias de 1500 a 2000 MHz. La altura efectiva de las estaciones base se fija a 30 metros, mientras que la altura efectiva del equipo de usuario se fija a 1.5 metros. Con estas asunciones, y ajustando la frecuencia de operación a 2 GHz, la expresión para las pérdidas de propagación en función de la distancia, viene dada por:

$$L = 134.79 + 35.22 \log d \text{ [dB]}, \quad (\text{A.1})$$

donde  $d$  representa la distancia en km entre el usuario y la estación base a la que está conectado. Además de las pérdidas de propagación, el simulador incluye un modelo de desvanecimiento lento basado en el hecho de que la media de la envolvente de la señal radio puede modelarse con una distribución log-normal, donde la media local, en dB, es una variable aleatoria gaussiana. La desviación estándar de la distribución depende del entorno considerado. El valor típico considerado para un área urbana de macroceldas es de 8 dB [127].

### A.2.2. Desvanecimiento rápido

Para modelar el efecto de la propagación multicamino, es necesario modelar el hecho de que el canal tiene un comportamiento distinto para cada usuario, cada instante de tiempo y cada frecuencia. Para incluir esta característica en el simulador, se han generado una serie de realizaciones de canal para todo el ancho de banda del sistema. El canal radio de propagación móvil se puede caracterizar como un sistema lineal variante en el tiempo [128]. Su respuesta al impulso es bidimensional, dependiente del retardo de las diferentes componentes multicamino y del tiempo. Para simular usuarios a distintas velocidades, las realizaciones multicamino no pueden depender de la variable del tiempo. Por esta razón, a la hora de obtener estas realizaciones, se selecciona como variable independiente la posición del usuario. De esta forma, se obtiene la respuesta al canal para cada posición del escenario.

Para obtener la dependencia con respecto a la posición, se aplica el modelo Rayleigh [129] en banda estrecha a cada una de las componentes multicamino. Se obtiene así un comportamiento en banda estrecha para cada posición espacial. Tras este proceso, se obtiene una variable gaussiana compleja bidimensional que se procesa con un filtro Doppler bidimensional siguiendo las indicaciones establecidas en [59]. Esto permite obtener una respuesta al impulso del canal dependiente de la distancia que separa el transmisor del receptor, en lugar de una respuesta al impulso variante en el tiempo. El último paso es la transformación de la variable retardo a la variable frecuencia, ya que en el simulador se necesita la respuesta en frecuencia del canal para cada posición del escenario y cada frecuencia del ancho de banda del sistema. Esto se logra mediante la transformación de Fourier.

### A.3. Nivel de enlace

A continuación, se definen las principales funcionalidades de la capa de enlace incluidas en el simulador, que son el cálculo de SIR, el esquema de retransmisiones, el proceso de adaptación del enlace y la asignación dinámica de recursos.

#### A.3.1. Cálculo de SIR

La función  $SIR$  representa una medida de la calidad del enlace que el usuario está experimentando. En el simulador, antes de obtener la SIR, es necesario realizar los cálculos de la interferencia experimentada por cada usuario. Para ello, se asume que la interferencia entre los usuarios que comparten celda es despreciable, ya que el planificador de recursos asigna diferentes frecuencias y ranuras temporales a cada usuario. Así, solo se considera la interferencia cocanal entre celdas debida a celdas interferentes que utilizan la misma subportadora. Esto requiere conocer el nivel de señal recibido por cada usuario procedente de las celdas (estaciones base o usuarios) interferentes. Por simplicidad, en los cálculos de interferencia, no se tiene en cuenta la respuesta de canal (es decir, el desvanecimiento rápido), sino solo las pérdidas de camino y el desvanecimiento lento. El cálculo de SIR para una subportadora dada  $k$ ,  $\gamma_k$ , se calcula utilizando la expresión propuesta en [130],

$$\gamma_k = P(k) \times \bar{G} \times \left( \frac{N}{N + N_p} \right) \times \frac{R_D}{N_{SD}/N_{ST}} \quad (\text{A.2})$$

donde  $P(k)$  representa el valor del perfil de potencia de desvanecimiento selectivo en frecuencia para la subportadora  $k$ ,  $\bar{G}$  es un término que depende de las pérdidas de propagación, el desvanecimiento lento, el ruido térmico y la interferencia experimentada,  $N$  es el tamaño de la FFT usada en la generación de la señal OFDM,  $N_p$  es la longitud del prefijo cíclico,  $R_D$  indica el porcentaje de la potencia máxima disponible asignada a las subportadoras de datos,  $N_{SD}$  es el número de subportadoras de datos por TTI y  $N_{ST}$  es el número total de subportadoras útiles por TTI.

Assumiendo que las magnitudes y las fases del desvanecimiento multicamino son constantes durante todo el intervalo de observación, el desvanecimiento selectivo

en frecuencia para la subportadora  $k$  se calcula usando la expresión

$$P(k) = \left| \sum_{p=1}^{paths} M_p A_p \exp(j[\theta_p - 2\pi f_k T_p]) \right|^2, \quad (\text{A.3})$$

donde  $p$  es el índice del camino,  $N_{paths}$  el número de caminos,  $M_p$  y  $\theta_p$  representan los valores de amplitud y fase del desvanecimiento multicamino respectivamente,  $A_p$  representa el valor de amplitud que se corresponde con la potencia media para el camino  $p$ ,  $f_k$  es el *offset* de frecuencia relativo dentro del espectro para la subportadora  $k$ , y  $T_p$  es el tiempo de retardo relativo del camino  $p$ . Además, se asume que el desvanecimiento está normalizado de forma que  $E[P(k) = 1]$ .

El valor de  $\bar{G}$  se calcula de la expresión

$$\bar{G} = \frac{P_{max} \frac{g_n(UE) \times g_{UE}}{PL_{UE,n} \times SH_{UE,n}}}{P_{ruido} + \sum_{k=1, k \neq n}^N P_{max} \times \frac{g_k(UE) \times g_{UE}}{PL_{UE,k} \times SH_{UE,k}}}, \quad (\text{A.4})$$

donde  $g_n$  es la ganancia de la antena servidora en la dirección del usuario,  $g_{UE}$  la ganancia del equipo terminal del usuario,  $P_{ruido}$  es la potencia de ruido térmico,  $PL_{UE,k}$  son las pérdidas de propagación entre el usuario y la estación base  $k$ ,  $SH_{UE,k}$  son las pérdidas de desvanecimiento lento entre el usuario y la estación base  $k$  y  $N$  es el número de estaciones base interferentes consideradas. Como un *PRB* contiene 12 subportadoras, es necesario agregar los valores de *SINR* calculados previamente para cada subportadora en un único valor. Así, la *SINR* efectiva, puede calcularse mediante la expresión

$$SINR_{ef} = -\beta \ln \left( \frac{1}{N_{sp}} \sum_{k=1}^{N_{sp}} e^{-\frac{\gamma_k}{\beta}} \right), \quad (\text{A.5})$$

donde  $\beta$  es un parámetro que depende del esquema de modulación y codificación (MCS) utilizado en el PRB [131], asumiendo que todas las subportadoras del PRB utilizan la misma modulación, y  $N_{sp}$  es el número de subportadoras usado para calcular la *SINR* efectiva. El valor de  $\beta$  se elige de forma que la probabilidad de error de bloque para todas las subportadoras sea similar a la obtenida para la *SINR* efectiva en un canal de ruido blanco aditivo gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN) [132].

Una vez calculada la *SINR* efectiva, se puede deducir la probabilidad de error de bloque (*Block Error Rate*, BLER). Para ello, se dispone de curvas que establecen la relación entre los valores de *SINR* y *BLER* para una canal con ruido blanco

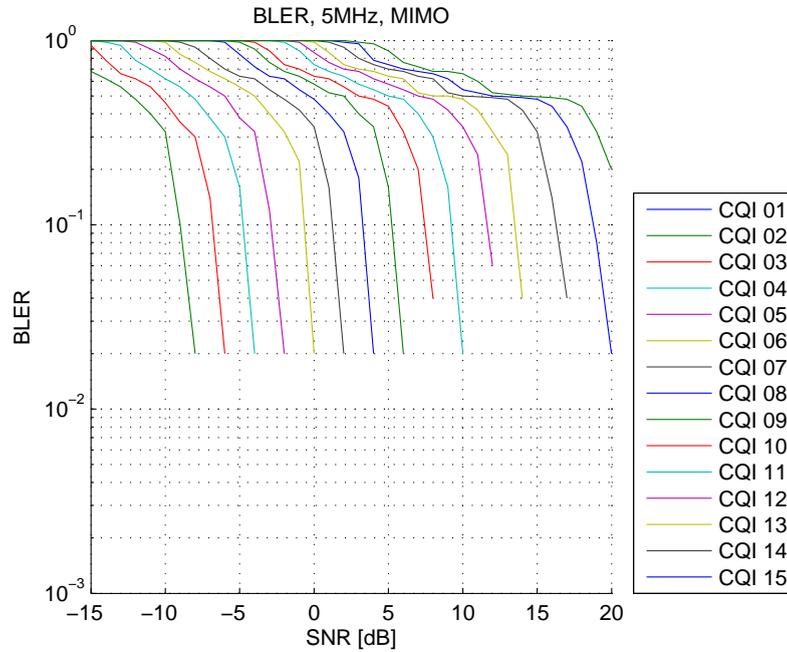


FIGURA A.3: Esquemas de modulación y codificación según SINR.

aditivo gaussiano (AWGN) y cada esquema de modulación y codificación. Un ejemplo de este mapeo  $SINR - BLER$  para un escenario con configuración de antena MIMO 2x2 y un ancho de banda del sistema de 5 MHz puede verse en la Fig. A.3. En la figura, se representa los esquemas de modulación y codificación según SINR, De izquierda a derecha, QPSK 1/3, QPSK 1/2, QPSK 2/3, QPSK 3/4, QPSK 4/5, QPSK, 16QAM 1/3, 16QAM 1/2, 16QAM 2/3, 16QAM 3/4, 16QAM 4/5 y 16QAM. Las curvas representadas han sido generadas con un simulador de nivel de enlace [58].

### A.3.2. Esquema de retransmisión

El mecanismo híbrido de retransmisión automática (HARQ) es una función a nivel de enlace que permite retransmisiones en la capa MAC en LTE. Con dicha función, se obtiene una mejora de BLER. En [133], se presenta un modelo de baja complejidad capaz de predecir de manera precisa la ganancia de esta función en la capa física. Dicho modelo se basa en el desplazamiento de las curvas de mapeo de  $SINR$  a  $BLER$ , calculado para cada retransmisión como

$$SINR(i) = SINR + SINR_{ganancia}(i), \quad (A.6)$$

donde  $i$  representa la retransmisión  $i$ -ésima,  $SINR$  representa el valor inicial, y  $SINR_{ganancia}(i)$  es la ganancia obtenida en cada retransmisión. El valor de  $SINR_{ganancia}(i)$  puede obtenerse de las tablas ofrecidas en [133]. Una vez obtenido el valor de BLER, es posible calcular la tasa de transmisión,  $T(i)$ , para cada usuario teniendo en cuenta el MCS utilizado en la transmisión, como

$$T(i) = (1 - BLER(SINR(i))) \times \frac{D_i}{TTI}, \quad (\text{A.7})$$

donde  $D_i$  es la carga útil por bloque en bits [134], que depende del MCS seleccionado para el usuario en ese intervalo de tiempo,  $TTI$  es el intervalo de tiempo de transmisión y  $BLER(SINR(i))$  es el valor  $BLER$  obtenido para la  $SINR$  efectiva.

### A.3.3. Adaptación del enlace

El indicador de calidad del canal, CQI, representa la calidad momentánea de la conexión en una subbanda del espectro. En función de dicho indicador, el planificador de la estación base decide el MCS utilizado para la transmisión [135]. En el simulador, se asume que cada usuario reporta el CQI a la estación base en cada iteración. Basándose en su valor, la función de adaptación del enlace selecciona el MCS más apropiado para transmitir la información en el *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) de forma que se garantice un valor de  $BLER$  [136].

### A.3.4. Asignación dinámica de recursos

Aunque la asignación de recursos es una función de la capa de red, se describe en este punto, porque es donde se implementa en el simulador. En éste, se incluyen distintos algoritmos de planificación dinámica de recursos (*schedulers*), como *Best Channel* (BC), *Round Robin to Best Channel* (RR-BC), *Long Delay First to Best Channel* (LDF-BC) o *Proportional Fair* (PF) [137]. En este trabajo, se ha considerado un planificador *Proportional Fair*. El objetivo de dicho planificador es encontrar un balance entre conseguir la máxima eficiencia posible del canal y mantener una cierta equidad entre los usuarios. Con este objetivo, el planificador no se basa únicamente en la tasa de transmisión potencial, sino que también tiene en cuenta la tasa de transmisión media del usuario en el pasado. Así, el algoritmo

sigue la expresión:

$$\hat{i}[n] = \underset{i}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{r_{ik}[n]}{\bar{r}_i} \right\}, \quad (\text{A.8})$$

donde  $\hat{i}[n]$  representa el usuario seleccionado en el instante temporal  $n$ ,  $r_{ik}$  representa la tasa de transmisión de usuario  $i$  en el PRB  $k$  y  $\bar{r}_i$  es la tasa de transmisión media experimentada por el usuario  $i$ .

Por simplicidad, no se consideran esquemas de coordinación de interferencia entre celdas. Así, se asume que la reutilización de frecuencias es total (es decir, el factor de reutilización es 1), y la asignación de recursos se realiza de forma independiente en cada celda.

## A.4. Nivel de red

La principal función de la capa de red es la gestión de recursos radio (RRM). En esta sección, se describen el algoritmo de control de admisión y de traspaso incluidos en el simulador.

### A.4.1. Control de admisión

Una vez que el usuario decide comenzar una conexión, la primera decisión que debe tomarse es qué celda debe servir esa conexión. En la red real, esta decisión se realiza mediante el proceso de acampada y el control de acceso. En el simulador, esta decisión se toma en dos pasos:

1. Primero se comprueba si el nivel de señal piloto recibido es suficiente. Para ello, el terminal envía a la red el nivel recibido de señal de referencia (RSRP), medido para la celda en la que está acampado y para sus vecinas. Tras ordenar las celdas de mayor a menor nivel, las celdas candidatas son aquellas que tienen niveles de RSRP por encima de un umbral, que será el mínimo requerido para aceptar una conexión. Éste umbral es un parámetro definido a nivel de celda. La mejor celda se selecciona como primera opción.
2. Posteriormente se comprueba si la celda seleccionada como primera opción tiene recursos disponibles. Se debe tener en cuenta que la red no sabe qué cantidad de recursos necesitará el usuario una vez haya iniciado la conexión,

ya que las medidas de calidad realizadas son sobre las señales de referencia, y las condiciones en los canales de datos pueden ser distintas. Por esta razón, en el simulador se usa un criterio de caso peor para aceptar al usuario.

### A.4.2. Detección automática de vecinas

La función de detección automática de vecinas (*Automatic Neighbor Relation*, ANR) [138] trata de liberar al operador de la costosa tarea de definir manualmente las relaciones de adyacencia entre celdas. En el simulador se ha incluido una función ANR para definir de forma automática las relaciones entre celdas adyacentes para cualquier escenario.

La implementación de la funcionalidad ANR se basa en el cálculo de las pérdidas de propagación media entre cualquier celda cercana  $j$  y la celda bajo estudio  $i$ . El cálculo de dicha pérdida de propagación,  $PL_{avg}(i, j)$ , que incluye atenuación, ganancias de antena y desvanecimiento lento, considera el promedio de todos los puntos servidos por una celda  $j$  hacia el emplazamiento de la celda bajo estudio  $i$ , calculado como

$$\overline{PL}(j, i) = \frac{1}{N_u(j)} \sum_{k \in A(j)} PL(k, i) \quad , \quad (\text{A.9})$$

donde  $N_u(j)$  es el número de usuarios en la celda  $j$ ,  $PL(k, j)$  son la pérdidas de propagación del punto  $k$  a la estación base  $j$ ,  $A(j)$  son los puntos o usuarios servidos por la celda  $j$ . Una vez calculado el valor de  $\overline{PL}(j, i)$  para todas las celdas  $j \neq i$ , se selecciona un conjunto de vecinas a partir de una lista ordenada de menor a mayor valor de  $\overline{PL}(j, i)$ .

### A.4.3. Traspaso

El algoritmo de traspaso se encarga de mantener la conexión cuando un usuario se desplaza. Para ello, el mecanismo de traspaso realiza el cambio de conexión del usuario de una celda a otra. El algoritmo de traspaso es específico de cada fabricante. En el simulador, se implementa el algoritmo de traspaso basado en el balance de potencia, que es el más extendido en LTE. El traspaso por balance de potencia persigue que el usuario esté siempre conectado a la celda que provea un mayor nivel de señal. Para ello, un traspaso por balance de potencia se dispara

cuando

$$\widehat{RSRP}(j) - \widehat{RSRP}(i) \geq HOM_{PBGT}(i, j), \quad (\text{A.10})$$

donde  $\widehat{RSRP}(j)$  y  $\widehat{RSRP}(i)$  son los niveles medios de señal piloto recibidos de la celda adyacente y servidora, respectivamente, y  $HOM_{PBGT}(i, j)$  es el margen de traspaso para la adyacencia  $(i, j)$ . Si el nivel de señal de la celda vecina se mantiene por encima del margen de traspaso establecido durante un periodo denominado *Time To Trigger* (TTT), se realiza finalmente el traspaso. El valor del parámetro  $HOM_{PBGT}(i, j)$  se fija en 3 dB para evitar traspasos innecesarios por desvanecimiento lento.



# Apéndice B

## Simulador estático de nivel de sistema para LTE

En este apéndice se presenta el simulador estático de nivel de sistema desarrollado en Matlab para validar el impacto de la planificación de PCI en el enlace ascendente y los algoritmos de agrupamiento de celdas en LTE. El simulador es una versión extendida del simulador descrito en [65]. Primero se definen los diferentes bloques funcionales del simulador, y posteriormente se detalla su funcionalidad.

### B.1. Estructura básica

En esta sección se describe el simulador estático para el enlace ascendente y descendente de LTE. A continuación se describe el escenario de simulación y el diagrama de flujo de la simulación.

#### B.1.1. Escenario de simulación

En esta herramienta de simulación se importa información real de la red para obtener escenarios realistas. Esta información incluye parámetros de configuración de las antenas, tales como su posición, potencia y orientación, información física de edificios, parámetros iniciales de carga de red o incluso la distribución espacial de usuarios real en un determinado rango de tiempo. Las figuras B.1 y B.2 muestran los escenarios de simulación implementados en este trabajo. En la Fig. B.1 se

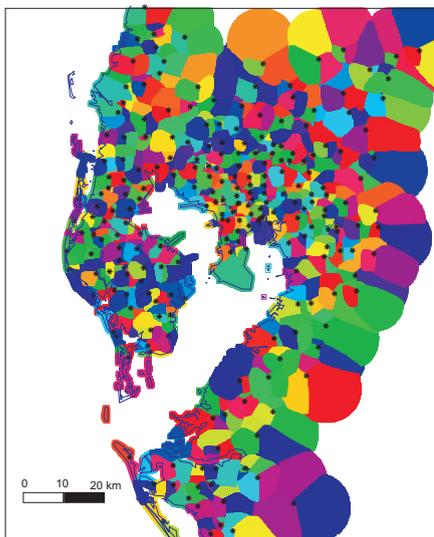


FIGURA B.1: Escenario real con límites costeros.



FIGURA B.2: Escenario real con edificios.

representa un escenario real con límites costeros. La topografía del terreno determina zonas libres de usuario (p.ej., zonas de agua), que son tenidas en cuenta a la hora de distribuir la densidad de usuarios por coronas. En la Fig. B.2 se representa un escenario real con información de los edificios situados en el área bajo estudio, necesario para la inclusión de celdas pequeñas en la evaluación.

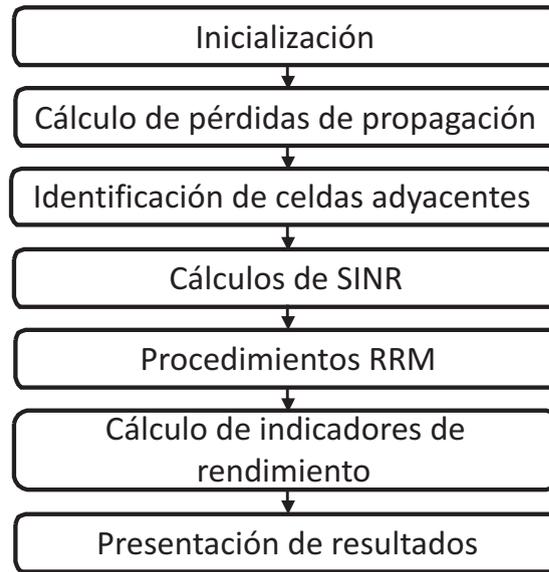


FIGURA B.3: Diagrama de flujo del simulador estático.

### B.1.2. Diagrama de flujo del simulador

La Fig. B.3 muestra un diagrama con los diferentes bloques del simulador.

En un primer paso, se configuran los parámetros de simulación. En el caso del simulador estático, la configuración de parámetros determina el escenario a simular (p.ej., localización de estaciones base, ángulos de apuntamiento de antenas, potencias de transmisión, ...), las características de los servicios y las principales características de la red (p.ej., ancho de banda del sistema, parámetros del algoritmo de control de potencia, ...) y los principales umbrales (SINR objetivo, atenuación máxima, ...). En la Tabla A.1 se presentan algunos de los parámetros configurables del simulador y un valor típico (utilizados en las simulaciones) de los mismos.

En segundo lugar, se calculan las pérdidas de propagación en el escenario. El objetivo es determinar la atenuación entre cualquier punto del escenario y cada estación base. Para ello, el escenario se divide en una rejilla de puntos, que representan las distintas ubicaciones posibles de los usuarios. Posteriormente, se genera una matriz de propagación que asigna un valor de pérdidas de propagación entre cada posible localización de usuario y cada estación base del escenario. Dichas pérdidas de propagación combinan las pérdidas de trayecto y las ganancias de las antenas transmisora y receptora. Una vez calculada la matriz de propagación, se define la lista de celdas adyacentes para cada celda. Para ello, se calcula el nivel

TABLA B.1: Parámetros de simulación.

Tipo de simulador	Nivel de sistema, estático (basado en rejilla)
Enlace	Descendente
Resolución de la rejilla	20 m
Distribución espacial del tráfico	Irregular, basado en el ratio de utilización del PRB y las medidas de TA reales
Frecuencia	Utilización media de PRB de la red = 31 %
Ancho de banda del sistema	2600 MHz
Modelo de propagación	10 MHz (50 PRBs)
Modelo de antena	Exterior: $PL = A - 13.82 * \log_{10}(h_{BS}[m]) + (B - 6.55 * \log_{10}(h_{BS}[m])) * \log_{10}(d[\text{km}])$ [dB]
Modelo de macrocelda	$A = 157.5, B = 44.9, h_{BS}[m] = 30$
Modelo de UE	Desvanecimiento lento lognormal, std.8 dB
	Distancia de correlación 20 m
	Exterior a interior: 10 dB pérdidas de penetración
	Configuración MIMO (2x2)
	$P_{tx} = 46$ dBm, $G_{max} = 13$ dB
	Altura de antena 1.5 m
	Suelo de ruido -114.45 dBm

medio de señal piloto recibido de cada estación base vecina en los puntos del área de servicio de la celda en cuestión. Aquellas vecinas que provean un mayor nivel medio de señal se incluyen en la lista de adyacentes. El cuarto paso realiza los cálculos de SINR, de manera similar al simulador dinámico. En el simulador estático, la principal diferencia reside en el cálculo de los niveles de interferencia, que se basa en valores medios (y no instantáneos) de carga. El quinto paso consiste en la ejecución de las funciones de gestión de recursos radio (RRM), que en el simulador estático son el proceso de acampada, el control de acceso y el algoritmo de control de potencia del enlace ascendente. Por último, se calculan los principales indicadores de rendimiento y se presentan resultados de forma ordenada. Las secciones siguientes describen las principales características del simulador en detalle.

## B.2. Nivel físico

### 1. Generación de tráfico

La generación de tráfico en el simulador se configura a través de la ocupación media de PRBs por celda y de la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda. La ocupación (o carga) media de celda es un parámetro que puede ajustarse con estadísticas de la red real. Por su parte, la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda puede ajustarse también por coronas en función de la distancia al emplazamiento a partir de las estadísticas de avance temporal (*timing advance*) [24].

## 2. Modelo de propagación radio

El modelo de propagación en el simulador estático incluye sólo las pérdidas de trayecto y el desvanecimiento lento. Para el cálculo de las pérdidas de trayecto, se emplea la extensión COST-231 del modelo Okumura-Hata [64]. Los valores de atenuación calculados mediante este modelo vienen determinados por la ecuación

$$a = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b + [44.9 - 6.55 \log_{10} h_b] \log_{10} d, \quad (\text{B.1})$$

donde  $f_c$  es la frecuencia de portadora,  $h_b$  es la altura de la estación base y  $d$  es la distancia de km. Por su parte, el desvanecimiento lento se basa en el hecho de que la media de la envolvente de la señal radio puede modelarse con una distribución log-normal, donde la media local, en dB, es una variable aleatoria gaussiana. La desviación estándar de la distribución depende del entorno considerado. El valor típico considerado para un área urbana de macroceldas es de 8 dB [127].

Para ahorrar tiempo de computación, se calcula una única matriz de propagación que incluye las pérdidas de trayecto, la ganancia de antena y el desvanecimiento lento.

## 3. Tratamiento de celdas especiales

La herramienta de simulación se ha concebido para manejar escenarios reales, por lo que deben gestionarse algunos casos especiales en la capa física. Específicamente, esta herramienta de simulación es capaz de manejar escenarios de red que incluyan sistemas de antena distribuidos (*Distributed Antenna Systems*, DAS) en macroceldas, celdas pequeñas (*Small Cells*) en interiores o exteriores en el entorno macro. Estos casos especiales necesitan de un tratamiento particular.

### a) Celdas distribuidas - DAS

Para un escenario dado, con unas restricciones topográficas del entorno concretas, es posible que una celda simple no sea capaz de dar cobertura a una zona determinada. En este caso, una de las técnicas que se propone en LTE es la capacidad de conformado de haz ofrecida por MIMO. Si aún con esta medida no es suficiente, se puede implementar un sistema de antenas distribuidas (*Distributed Antenna System*, DAS). Esta capacidad puede explotarse para mejorar la cobertura cuando existe una

distribución no uniforme de tráfico y/o para dar cobertura a diferentes áreas con una única celda y un DAS. En [89], se presenta una revisión reciente de cómo los DAS están evolucionando para proveer mayor rendimiento en los sistemas celulares como LTE.

El tratamiento que se da en el simulador a este tipo de celdas con DAS es tan simple como hacer un cálculo en dos pasos: 1) calcular la matriz de propagación de cada rama del DAS mediante B.1 y la apropiada ganancia de antena y 2) combinar las matrices de propagación de las distintas ramas del DAS pertenecientes a la misma celda. Esta técnica puede expresarse matemáticamente como

$$PL_{Mtx,cell} = -10 \cdot \left( \sum_{br} 10^{\frac{-PL_{Mtx,branch}(br)}{10}} \right), \quad (B.2)$$

donde  $PL_{Mtx,cell}(x, y, c)$  son las pérdidas de propagación totales entre el punto del escenario de índices (x,y) y la celda  $c$ , y  $PL_{Mtx,branch}(x, y, c, br)$  son las pérdidas de propagación ofrecida por cada una de las ramas  $br$  del DAS.

*b) Celdas pequeñas*

En escenarios LTE reales, existen celdas en interiores que usan la misma frecuencia que las macroceldas. En consecuencia, las celdas de interior no deben omitirse en el análisis de rendimiento de red, ya que tienen un impacto directo en los niveles de interferencia y carga de la red. En la herramienta de simulación, el área de servicio de la celda pequeña se define como un único punto del mallado, identificado como el punto más cercano a la posición de la misma. Se asume, por tanto, que el área de servicio de la celda pequeña queda contenida en un único punto. Para aquellos puntos servidos por celdas pequeñas, se consideran unas pérdidas por propagación típicas de 90 dB con la estación base servidora. Igualmente, para el cálculo de interferencia en esos puntos, se añaden unas pérdidas de penetración adicionales en la matriz de propagación (normalmente 10 dB) para las macroceldas.

### B.3. Nivel de enlace

En esta sección se describe el algoritmo de control de potencia, el esquema de asignación de recursos y el algoritmo de modulación adaptativa implementado en el simulador.

#### B.3.1. Algoritmo de control de potencia en el enlace ascendente

El objetivo del control de potencia es ajustar la potencia transmitida por el terminal para garantizar unos requisitos de calidad de conexión determinados en la estación base. El esquema de control de potencia tanto en el canal PUSCH como en el PUCCH de LTE es el resultado de combinar un algoritmo en lazo abierto (*Open-Loop Power Control*, OLPC) y un algoritmo en lazo cerrado (*Closed-Loop Power Control*, CLPC). EL OLPC está pensado para compensar las variaciones lentas de canal, mientras que el CLPC se adapta a cambios en las condiciones de interferencia o errores de estimación de las pérdidas de propagación. En el algoritmo estandarizado por el 3GPP [139], la potencia transmitida por el UE (en dBm) en el PUSCH viene dada por:

$$P_{tx} = \min \{ P_{tx_{\max}}, P_{0,PUSCH} + \alpha \cdot PL + \Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC}) + 10 \cdot \log_{10} M_{PUSCH} \} , \quad (\text{B.3})$$

y, en el PUCCH, por

$$P_{tx}(u) = \min \{ P_{tx_{\max}}, P_{0,PUCCH} + \alpha \cdot PL + \Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC}) \} , \quad (\text{B.4})$$

, donde  $P_{tx_{\max}}$  es la máxima potencia de transmisión del UE,  $\alpha$  es el factor de compensación de pérdidas de propagación en el canal,  $PL$  son las pérdidas por propagación,  $M_{PUSCH}$  es el número de PRBs asignados al UE, y  $\Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})$  es un término dinámico que depende del esquema de modulación seleccionado y de los comandos de control de potencia enviados por el eNB.

### B.3.2. Esquema de asignación de PRB en el enlace ascendente

El esquema de asignación de PRB tiene un gran impacto sobre el rendimiento de LTE tanto en UL como en DL. El planificador dinámico de recursos, localizado en el eNB, asigna recursos a los usuarios de forma que se maximice el rendimiento del sistema en términos de QoS y tasa de datos. En la herramienta de simulación, se implementa un planificador para el canal de datos (PUSCH) del enlace ascendente muy simple, basado en dos etapas. En una primera etapa, se realiza una asignación preliminar de PRBs (*esquema de asignación inicial*) basándose en el algoritmo de control de potencia en UL en lazo abierto. El número de PRBs asignados a un usuario  $k$ ,  $M(k)$  es el número máximo de PRBs que se pueden asignar a un UE de forma que éste sea capaz de garantizar  $P_0$  en la estación base servidora.  $M(k)$  se calcula como

$$M(k) = \text{máx} \left\{ M_{\text{mín}}, \text{mín} \left( 10^{(P_{TX_{\text{máx}} - \alpha \cdot PL(k) - P_0(k)})/10}, M_{\text{máx}} \right) \right\}, \quad (\text{B.5})$$

donde  $M_{\text{mín}}$  y  $M_{\text{máx}}$  son el número mínimo y máximo que pueden asignarse a un UE (definido por el ancho de banda del sistema),  $PL(k)$  son las pérdidas de propagación para el usuario  $k$  (incluyendo ganancias de antena, atenuación y desvanecimientos lentos) y  $P_0(k)$  es el valor de potencia nominal para la celda servidora del usuario  $k$ . En LTE,  $M_{\text{mín}}=2$  y  $M_{\text{máx}}$  varía entre 6 y 100 dependiendo del ancho de banda disponible [24]. Como resultado, se obtiene una estima inicial del número de PRB usados por cada usuario. A partir de esta estimación, se realiza una predicción de los niveles medios de interferencia UL. En una segunda etapa, un segundo esquema (al que se referirá como *esquema de asignación refinado*) modela el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado. En dicho esquema, se calcula la asignación final de PRBs para cada usuario de forma que se garantice una SINR objetivo basándose en la estimación de interferencia realizada con el *esquema de asignación inicial*. El cálculo se expresaría como

$$M(k) = \text{máx} \left\{ M_{\text{mín}}, \text{mín} \left( 10^{(P_{TX_{\text{máx}} - \alpha \cdot PL(k) - I_{UL}(S(k)) - SINR_{th})/10}, M_{\text{máx}} \right) \right\}, \quad (\text{B.6})$$

donde  $I_{UL}(S(k))$  es la interferencia más ruido en la celda  $S(k)$  y  $SINR_{th}$  es el umbral de SINR que se quiere cumplir (normalmente, -2.8 dB [24]).

Para el canal de control (PUCCH), cada transmisión ocupa un PRB de control.

Al igual que en el simulador dinámico, no se consideran esquemas de coordinación de interferencia entre celdas. Así, se asume que la reutilización de frecuencias es total (es decir, el factor de reutilización es 1), y la asignación de recursos se realiza de forma independiente en cada celda.

### B.3.3. Esquema de modulación y codificación adaptativa

La selección del esquema de modulación y codificación se hace en base a la información enviada por el usuario al eNB sobre el estado del canal, mediante reportes de CQI. Dependiendo de los parámetros de transmisión configurados y las condiciones del enlace radio, se determina la máxima tasa de datos alcanzable por PRB. En este trabajo, se modela el esquema de modulación adaptativa mediante la fórmula truncada de *Shannon* [140]. Así, la tasa de transmisión máxima alcanzable por PRB se obtiene directamente del valor de SINR estimado en la posición de cada usuario  $k$  según la expresión

$$TH_{perPRB}(k) = \begin{cases} 0 & SINR(k) < SINR_{min}, \\ \beta \log_2(1 + SINR(k)) & SINR_{min} \leq SINR(k) \leq SINR_{max}, \\ TH_{perPRB_{max}} & SINR_{max} < SINR(k), \end{cases} \quad (B.7)$$

donde  $TH_{perPRB_{max}}$  es la máxima tasa de datos por PRB que se puede obtener,  $SINR_{max}$  y  $SINR_{min}$  son los valores de SINR con los que se alcanzan los valores de  $TH_{perPRB_{max}}$  y  $TH_{perPRB_{min}}$ , respectivamente, y  $\beta$  es una constante de corrección. En este trabajo,  $\beta = 0.6$ ,  $TH_{perPRB_{max}} = 514$  kbps,  $SINR_{max} = 14$  dB y  $SINR_{min} = -9$  dB.

La tasa de transmisión final de cada usuario se calcula multiplicando la tasa de datos por PRB, obtenida según la SINR que experimenta el usuario  $k$ , por el número de PRB asignados al usuario  $k$ ,  $M(k)$ , según

$$TH_{us}(k) = TH_{perPRB}(k) M(k) \quad (B.8)$$

## B.4. Nivel de red

Dada la naturaleza estática de este simulador, solo se describen dos procedimientos relevantes a nivel de red: el control de admisión y la detección automática de vecinas.

### B.4.1. Control de admisión

El primer paso para iniciar una conexión por parte de un terminal es decidir cuál será la celda servidora del usuario. En el simulador estático, esta decisión se realiza exclusivamente en función del nivel recibido de potencia de señal de referencia (RSRP). Para cada usuario, la conexión se realiza con aquella celda de la que recibe mayor nivel de RSRP. Se asume que aquellas ubicaciones del escenario (usuarios) que reciben un nivel de RSRP por debajo del umbral preestablecido para el traspaso hacia otra tecnología (*inter-Radio Access Technology, iRAT*), no pueden establecer conexión con ninguna celda LTE, y, por tanto, se descartan. Por tanto, la celda servidora debe cumplir

$$RSRP(i) \geq iRAT\_HO\_RSRP\_th \quad , \quad (B.9)$$

donde  $RSRP(i)$  es el nivel de RSRP de la celda  $i$  recibido en el usuario bajo estudio y  $iRAT\_HO\_RSRP\_th$  es el umbral de iRAT, definido por parte del operador a nivel de grupo de celdas.

### B.4.2. Detección automática de vecinas

La función de detección automática de vecinas (*Automatic Neighbor Relation, ANR*) [138] trata de liberar al operador de la costosa tarea de definir manualmente las relaciones de adyacencia entre celdas. En el simulador se ha incluido una función ANR para definir de forma automática las relaciones entre celdas adyacentes para cualquier escenario.

La implementación de la funcionalidad ANR se basa en el cálculo de las pérdida de propagación media entre cualquier celda cercana  $j$  y la celda bajo estudio  $i$ . El cálculo de dicha pérdida de propagación,  $PL_{avg}(i, j)$ , que incluye atenuación, ganancias de antena y desvanecimiento lento, considera el promedio de todos los puntos servidos por una celda  $j$  hacia el emplazamiento de la celda bajo estudio  $i$ , calculado como

$$\bar{P}L(j, i) = \frac{1}{N_u(j)} \sum_{k \in A(j)} PL(k, i) \quad , \quad (B.10)$$

donde  $N_u(j)$  es el número de usuarios en la celda  $j$ ,  $PL(k, j)$  son la pérdidas de propagación del punto  $k$  a la estación base  $j$ ,  $A(j)$  son los puntos o usuarios servidos por la celda  $j$ . Una vez calculado el valor de  $\bar{P}L(j, i)$  para todas las celdas

$j \neq i$ , se selecciona un conjunto de vecinas a partir de una lista ordenada de menor a mayor valor de  $\bar{P}L(j, i)$ .



# Bibliografía

- [1] J. Olmos, A. Serra, S. Ruiz, M. García-Lozano, y D. González, “Link Level Simulator for LTE Downlink,” en *7th European Meeting COST-2100, COST Action IC1004, Braunschweig*, 2009.
- [2] 3rd Generation Partnership Project, “TR 36.211 V11.2.0; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRA); Physical Channel and Modulation (Release 11),” Reporte técnico, 2013.
- [3] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] *Marco para los servicios soportados por la IMT*, Recomendación UIT-R M.1822, 2007.
- [5] 3rd Generation Partnership Project, “3GPP TR 125.913, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),” 2013.
- [6] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). <http://www.3gpp.org/>, accedido en marzo, 2017.
- [7] 4G Americas, “Recommendations on 5G Requirements and Solutions,” Reporte técnico, Octubre 2014.
- [8] *NGMN Use Cases Related to Self Organising Network, Overall Description*, NGMN Alliance Std. V2.02, Diciembre 2008.
- [9] J. Lempiainen y M. Manninen, *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*. Springer, 2001.
- [10] J. Laiho, A. Wacker, y T. Novosad, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. John Wiley & Sons, 2002.

- 
- [11] A. R. Mishra, *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G. Evolution to 4G*. John Wiley & Sons, 2004.
- [12] Mishra A. R., *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G. Evolution to 4G*. John Wiley & Sons, 2007.
- [13] L. Song y J. Shen, *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*. CRC Press, 2011.
- [14] L. Korowajczuk, *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] J. Ramiro y K. Hamied, *Self-Organizing Networks: Self-Planning, Self-Optimization and Self-Healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons, 2011.
- [16] S. Hamalainen, H. Sanneck, y C. Sartori, *LTE Self-Organising Networks (SON)*. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] A. Eisenblatter, “Frequency Assignment in GSM Networks: Models, Heuristics, and Lower Bounds,” Memoria de tesis, TU Berlin, 2000.
- [18] H. Hafez, F. E. Z. El-Taher, R. A. Ramadan, y A. Gaber, “Scrambling code planning and optimization for UMTS system,” en *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2014, pp. 1968–1973.
- [19] T. Bandh, G. Carle, y H. Sanneck, “Graph coloring based Physical-Cell-ID assignment for LTE networks,” *International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 116–120, 2009.
- [20] M. Toril, I. Molina-Fernández, V. Wille, y C. Walshaw, “Analysis of Heuristic Graph Partitioning Method for the Assignment of Packet Control Unit in GERAN,” *Wireless Personal Communications*, vol. 60, pp. 611–633, 2011.
- [21] M. Toril and V. Wille and R. Barco, “Optimization of the Assignment of Cells to Packet Control Units in GERAN,” *IEEE Communications Letters*, vol. 10, pp. 219–221, 2006.
- [22] M. Toril y V. Wille, “Optimization of the Assignment of Base Stations to Base Station Controllers in GERAN,” *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 6, pp. 477–479, 2008.

- [23] M. Toril, S. Luna-Ramírez, y V. Wille, “Automatic Replanning of Tracking Areas in Cellular Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, pp. 2005–2013, 2013.
- [24] S. Sesia, I. Toufik, y M. Baker, *LTE: The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice*. Wiley, 2009.
- [25] 3GPP, “Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN),” en *TS 23.401*.
- [26] 3GPP, “Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements,” en *TS 32.500*.
- [27] 4G Americas, “The benefits of SON in LTE: Self-optimizing and self-organizing networks,” Reporte técnico, Diciembre 2009.
- [28] 3rd Generation Partnership Project, “TR 36.902 V9.3.1; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-Configuring and Self-Optimizing Network (SON) Use Cases and Solutions (Release 9),” Reporte técnico, Marzo 2011.
- [29] J. Zyren y D. McCoy, “Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer,” Freescale Semiconductor, Reporte técnico, 2007.
- [30] F. Ahmed, O. Tirkkonen, M. Peltomäki, J.-M. Koljonen, C.-H. Yu, y M. Alava, “Distributed graph coloring for Self-Organization in LTE Networks,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010.
- [31] H. Xu, X. W. Zhou, y Y. Li, “Model of hypergraph colouring for Self-configuration in LTE Networks,” *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII)*, 2011.
- [32] D. Brezaz, “New methods to color the vertices of a graph,” *Communications of AMC*, vol. 22, no. 4, pp. 251–256, 1979.
- [33] M. Chams, A. Hertz, y D. de Werra, “Some experiments with simulated annealing for coloring graphs,” *European Journal of Operational Research*, vol. 32, no. 2, pp. 260 – 266, 1987.

- [34] A. Hertz y D. de Werra, “Using tabu search techniques for graph coloring,” *Computing*, vol. 39, no. 4, pp. 345–351, 1987.
- [35] Z. Matloub y I. Kostaric, “Methodology for the Physical Cell Identity Assignment in LTE Networks,” *International Journal of Networks and Communications*, vol. 3 (5), pp. 111–117, 2013.
- [36] Y. Liu, W. Li, H. Zhang, y L. Yu, “Distributed PCI assignment in LTE based on consultation mechanism,” en *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), (2010)*, pp. 1–4.
- [37] Y. Wei, M. Peng, W. Wang, S. Min, J. M. Jiang, y Y. Huang, “Automatic Distributing Schemes of Physical Cell Identity for Self-Organizing Networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012.
- [38] J. Oppolzer y R. Bestak, “Physical Cell Identifier assignment in LTE-Advanced networks,” en *5th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2012.
- [39] P. Lee, J. Jeong, N. Saxena, y J. Shin, “Dynamic Reservation Scheme of Physical Cell Identity for 3GPP LTE Femtocell Systems,” *Journal of Information Processing Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 207–220, 2007.
- [40] T. Wu, L. Rui, A. Xiong, y S. Guo, “An Automation PCI Allocation Method for eNodeB and Home eNodeB Cell,” en *6th International Conference on IEEE Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2010.
- [41] Y. Wu, H. Jiang, Y. Wu, y D. Zhang, “Physical Cell Identity Self-Organization for Home eNodeB Deployment in LTE,” en *6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2010, pp. 1–6.
- [42] X. Zhan, D. Zhou, Z. Xiao, E. Liu, J. Zhang, y A. A. Glasunov, “Dynamic Group PCI Assignment Scheme,” en *7th International Conference on Wireless and Mobile Communication, ICWMC, (2011)*.
- [43] J. Lim y D. Hong, “Management of neighbor cell lists and physical cell identifiers in Self-Organizing Heterogeneous Networks,” *Communications and Networks*, vol. 13, pp. 367–376, 2011.

- [44] A. Zahran, “Extended Synchronization Signals for eliminating PCI confusion in heterogeneous LTE,” en *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), (2012)*, pp. 2588–2592.
- [45] M. Krichen, D. Barth, y O. Marce, “Performances evaluation of different algorithms for PCIs Self Configuration in LTE,” en *18th IEEE International Conference on Networks (ICON), (2012)*, pp. 197–203.
- [46] F. Ahmed y O. Tirkkonen, “Self Organized Physical Cell ID Assignment in Multi-Operator Heterogeneous Networks,” en *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, 2015*, pp. 1–5.
- [47] S. S. Mwanje, J. Ali-Tolppa, y H. Sanneck, “On the Limits of PCI Auto Configuration and Reuse in 4G/5G Ultra Dense Networks,” en *11th International Conference on Network and Service Management (CNSM), 2015, 2015*, pp. 92–98.
- [48] E. Fredrik Egrelius, “Method and arrangment for PCI assignment,” US Patente WO2014/120 056 A1, 2014.
- [49] A. Gupta y R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [50] G. Karypis y V. Kumar, “A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices, version 4.0,” University of Minnesota, Departament of Computer Science / Army HPC Research Center, Reporte técnico, 1998.
- [51] C. Walshaw y M. Cross, “Jostle: Parallel multilevel graph-partitioning software - an overview,” *Mesh Partitioning Techniques and Domain Decomposition Techniques*, pp. 27–58, 2007.
- [52] B. Hendrickson y R. Leland, “The Chaco user’s guide; Version 2.0, Technical Report SAND94-2692,” 1994. Disponible en: <https://cfwebprod.sandia.gov/cfdocs/CompResearch/docs/guide.pdf>,
- [53] B. Hendrickson and R. Leland, “A multinivel algorithm for partitions graphs,” en *ACM/IEE Conference on Supercomputing*, 1995.
- [54] G. Karypis y V. Kumar, “Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 48, no. 1, pp. 96–129, 1998.

- [55] C. Walshaw y M. Cross, “Mesh partitioning: a multilevel balancing and refinement algorithm,” *SIAM Journal of Scientific Computing*, vol. 22, no. 1, pp. 66–80, 2000.
- [56] S. Budisin, “Decimation Generator of Zadoff-Chu Sequences,” en *Sequences and Their Applications-SETA, 2010*, vol. 6338, 2010, pp. 30–40.
- [57] Y. H. Nam, Y. Akimoto, Y. Kim, M. i. Lee, K. Bhattad, y A. Ekpenyong, “Evolution of reference signals for LTE-advanced systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 132–138, 2012.
- [58] C. Mehführer, J. C. Ikuno, M. Simko, S. Schwarz, M. Wrulich, y M. Rupp, “The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011.
- [59] P. Muñoz, I. de la Bandera, F. Ruiz, S. Luna-Ramírez, R. Barco, M. Toril, P. Lázaro, y J. Rodríguez, “Computationally-Efficient design of a Dynamic System-Level LTE simulator,” *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 57, pp. 347–358, 2011.
- [60] A. G. Dabak, E. N. Onggosanusi, y A. Papasakellariou, “Computer generated sequences for downlink and uplink signals in wireless communication systems,” US Patente 20 080 267 137 A1, 2008.
- [61] P. Burstrom, S. Falahati, y A. Simonsson, “Uplink Control Channel in E-UTRA, Radio Link and Radio Network Evaluation,” en *Wireless Communications and Networking Conference, 2008*, 2008, pp. 835–839.
- [62] 3rd Generation Partnership Project, “Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8), TR 36.213 V8.8.0,” Reporte técnico, 2009-10.
- [63] 3rd Generation Partnership Project, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay radio transmission and reception, TS 36.116, (Release 11),” Reporte técnico, 2013.
- [64] COST Action 231, “Digital mobile radio. Towards future generation system final report,” European Communities, Reporte técnico EUR 18957, Ch. 4, 1999.

- [65] J. A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, A. B. Vallejo-Mora, y C. Úbeda, “A computationally efficient method for self-planning uplink power control parameters in LTE,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, 2015.
- [66] A. Soper, C. Walshaw, y M. Cross, “A Combined Evolutionary Search and Multilevel Optimisation Approach to Graph-Partitioning,” *Journal of Global Optimization*, vol. 29, pp. 225–241, 2004.
- [67] R. Preis y R. Diekmann, “The PARTY Partitioning-Library, User Guide, TR-RSFB-96-024,” 1996.
- [68] F. Pellegrini, “Scotch and libScotch 3.4, User’s Guide, Research Report 1264-01,” Universite of Bourdeaux, France, Reporte técnico, 2001.
- [69] M. R. Garey y D. S. Jonhson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of  $\mathcal{NP}$ -Completeness*, Freeman, San Francisco, 1979.
- [70] K. Schloegel, G. Karypis, y V. Kumar, *Graph partitioning for high performance scientific simulations*, M. Kaufmann, Ed., 2000.
- [71] C. Walshaw, “A multilevel approach to the graph colouring problem,” Computing and Mathematical Sciences, University of Greenwich, Mathematics Research Report 01/IM/69, 2001.
- [72] R. Martí, “Multistart methods,” *Handbook on Metaheuristics*, pp. 355–368, 2000.
- [73] C. Farhat, “A simple and efficient automatic fem domain descomposer,” *Computers and Structures*, vol. 28, no. 5, pp. 579–602, 1988.
- [74] C. Fiduccia y R. Mattheyses, “A linear-time heuristic for improving network partitions,” en *Proc 19th ACM/IEEE Design Automation Conference*, 1982, pp. 175–181.
- [75] C. E. Leiserson, T. H. Cormen, y C. S. . R. Rivest, *Introduction to Algorithm*, T. H. Cormen, Ed. MIT Press, 1990.
- [76] M. Toril, “Self-tuning algorithm for the assignment of packet control units and handover parameters in GERAN,” Memoria de tesis, 2007.
- [77] T. H. Cormen, C. Stein, R. L. Rivest, y C. E. Leiserson, *Introduction to Algorithms*. Mc. Graw-Hill Higher Education, 2001.

- [78] Ericsson, “Ericsson mobility report,” Disponible en: <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-june-2015.pdf>, (accedido en Marzo 2017)., Reporte técnico, Junio 2016.
- [79] S. Saunders, “The role of cooperation in establishing an efficient femto economy,” Diciembre 2007.
- [80] V. Chandrasekhar, J. Andrews, y A. Gatherer, “Femtocell networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, pp. 59–67, Sep 2008.
- [81] 3GPP, “UTRAN architecture for 3G Home NodeB,” en *TS 25.467*.
- [82] R. Raheem, A. Lasebae, M. Aiash, y J. Loo, “From fixed to mobile femtocells in LTE systems: Issues and challenges,” en *2013 Second International Conference on Future Generation Communication Technology (FGCT)*, Noviembre 2013, pp. 207–212.
- [83] R. Raheem, A. Lasebae, y J. Loo, “Performance Evaluation of LTE Network via Using Fixed/Mobile Femtocells,” en *2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, Mayo 2014, pp. 255–260.
- [84] G. Jeney, “Practical Limits of Femtocells in a Realistic Environment,” en *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011, pp. 1–5.
- [85] A. M. Saleh, A. Rustako, y R. S. Roman, “Distributed Antennas for Indoor Radio Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 35, 1987.
- [86] K. Kerpez, “A radio access system with distributed antennas,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 265–275, 1996.
- [87] H. Osman, H. Zhu, y J. Wang, “Downlink distributed antenna systems in indoor high building femtocell environments,” en *2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2010, pp. 1016–1020.
- [88] M. Tolstrup, *Indoor Radio Planning: A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE*, J. Wiley y Sons, Eds., 2015.

- [89] R. Heath, S. Peters, Y. Wang, y J. Zhang, “A current perspective on distributed antenna systems for the downlink of cellular systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 161–167, Abril 2013.
- [90] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning, y L. Nan, “Trends in small cell enhancements in LTE advanced,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, no. 2, pp. 98–105, Febrero 2013.
- [91] S. Melkote y M. Daskin, “Capacitated facility location/network design problem,” *European Journal of operational Research*, vol. 129, pp. 448–495, 2001.
- [92] K. Holmberg, M. Rannqvist, y D. Yuan, “An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing,” *European Journal of Operational Research*, vol. 113, no. 3, pp. 544 – 559, 1999.
- [93] C. Lee y H. Kang, “Cell planning with capacity expansion in mobile communications: a tabu search approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 1678–1691, 2000.
- [94] A. J. Nebro, F. Chicano, y F. Luna, “Optimal antenna placement using a new multi-objective CHC algorithm,” en *6th International Conference Numerical Methods and Applications*, 2007.
- [95] L. Raisanen y R. Whitaker, “Comparison and evaluation of multiple objective genetic algorithms for the antenna placement problem,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, no. 1-2, pp. 79–88, 2005.
- [96] E. Amaldi, A. Capone, y F. Malucelli, “Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 5, pp. 939–952, Septiembre 2003.
- [97] P. Avella, S. Mattia, y A. Sassano, “Metric inequalities and the network loading problem,” *Discrete Optimization*, vol. 4, no. 1, pp. 103–114, 2007.
- [98] L. Nagy y L. Farkas, “Indoor base station location optimization using genetic algorithms,” en *11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, 2000, pp. 843–846.

- [99] Z. Ji, T. K. Sarkar, y B.-H. Li, “Methods for optimizing the location of base stations for indoor wireless communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 10, pp. 1481–1483, Octubre 2002.
- [100] J. Wong, A. Mason, M. Neve, y K. Sowerby, “Base station placement in indoor wireless systems using binary integer programming,” *IEE Proceedings Communications*, vol. 153, no. 5, pp. 771–778, Octubre 2006.
- [101] Y. Ngadiman, Y. Chew, y B. Yeo, “A new approach for finding optimal base stations configuration for CDMA systems jointly with uplink and downlink constraints,” en *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 4, Septiembre 2005, pp. 2751–2755.
- [102] T. Fruhwirth y P. Brisset, “Placing base stations in wireless indoor communication networks,” *Intelligent Systems and their Applications, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 49–53, Enero 2000.
- [103] S. Fortune, D. Gay, B. Kernighan, O. Landron, R. Valenzuela, y M. Wright, “Wise design of indoor wireless systems: practical computation and optimization,” *Computational Science Engineering, IEEE*, vol. 2, no. 1, pp. 58–68, 1995.
- [104] L. Pujji, K. Sowerby, y M. Neve, “Development of a hybrid algorithm for efficient optimisation of base station placement for indoor wireless communication systems,” *Wireless Personal Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 471–486, 2013.
- [105] M. Abd Rahman, M. Dashti, y J. Zhang, “Localization of unknown indoor wireless transmitter,” en *International Conference on Localization and GNSS*, Jun 2013, pp. 1–6.
- [106] J. M. Ruiz, M. Toril, y S. Luna, “A femtocell location strategy for improving adaptive traffic sharing in heterogeneous lte network,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015.
- [107] M. Neuland, T. Kurner, y M. Amirijoo, “Influence of positioning error on x-map estimation in lte,” en *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2011, pp. 1–5.

- [108] A. Sánchez, R. Acedo-Hernández, M. Toril, S. Luna-Ramírez, y C. Úbeda, “A trace data-based approach for an accurate estimation of precise utilization maps in lte,” *Mobile Information Systems*, vol. 2017, 2017.
- [109] S. Hurley, “Automatic base station selection and configuration in mobile networks,” en *Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No.00CH37152)*, vol. 6, 2000, pp. 2585–2592 vol.6.
- [110] S. Jamaa, Z. Altman, J. Picard, y B. Fourestie, *Optimisation des reseaux mobiles utilisant les Algorithms Genetiques*. J. Drezo et al. (eds.) Eyrolles, 2003.
- [111] C. Lu, M. Berg, E. Trojer, P. Eriksson, K. Laraqui, O. Tridblad, y H. Almeida, “Connecting the dots: small cells shape up for high-performance indoor radio,” *Ericsson Review*, December 2014.
- [112] Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corporation y Alcatel Lucent and Nokia Networks, “Common public radio interface (CPRI); interface specification,” Reporte técnico, 2015.
- [113] B. Braden, “The Surveyor’s Area Formula,” *The College Mathematics Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 326–337, 1986.
- [114] M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, Agosto 1980.
- [115] M. J., S. Rimac-Drlje, y K. Bejuk, “Comparison of propagation models accuracy for wimax on 3.5 ghz,” en *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2007. ICECS 2007.*, Diciembre 2007, pp. 111–114.
- [116] Gurobi Optimization, Disponible en: [www.gurobi.com](http://www.gurobi.com) (accedido en Marzo 2017).
- [117] W. Navidi, *Statistics for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill Higher Education, 2008.

- [118] A. M. J. Kuurne, “On gsm mobile measurement based interference matrix generation,” en *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*, vol. 4, 2002, pp. 1965–1969 vol.4.
- [119] 3rd Generation Partnership Project, “TS 36.331; LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification; v. 10.7.0; (Release 10),” Reporte técnico, 2012.
- [120] V. Buenestado, M. Toril, S. Luna, J. Ruiz, y A. Mendo, “Self-tuning of remote electrical tilts based on call traces for coverage and capacity optimization in LTE,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016.
- [121] J. Ruíz, I. de la Bandera, A. Vallejo, V. Buenestado, M. Toril, y M. Regueira, “Construcción de contadores sintéticos mediante procesado de eventos complejo en redes lte,” en *URSI 2013, Santiago de Compostela (España)*, 2013.
- [122] A. Imran, A. Zoha, y A. Abu-Dayya, “Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G,” *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 27–33, Noviembre 2014.
- [123] A. Eisenblatter, M. Grottschel, y A. M. Koster, *Discussiones Mathematicae 51 Graph Theory 22*, 2002.
- [124] Y.-H. Jung y Y. H. Lee, “Scrambling code planning for 3gpp w-cdma systems,” en *IEEE 53rd Vehicular Technology Conference (VTC 2001 Spring)*, Rhodes, Greece, 2001.
- [125] T. Hytönen, “Optimal wrap-around network simulation,” *Helsinki University of Technology Institute of Mathematics: Research Reports*, 2001.
- [126] U. Gotzner y R. Rathgeber, “Spatial traffic distribution in cellular networks,” en *Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th IEEE*, vol. 3, Mayo 1998, pp. 1994–1998 vol.3.
- [127] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*, U. New York, NY, Ed. Cambridge University Press, 2009.
- [128] J. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech, Ed., 1992.
- [129] W. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, Wiley, Ed., 1974.

- [130] 3GPP, “Feasibility study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement,” en *TS 25.892*.
- [131] 3GPP, “System Analysis of the Impact of CQI Reporting Period in DL SIMO OFDMA,” en *R1-061506*.
- [132] E. Tuomaala y H. Wang, “Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network,” en *Mobile Technology, Applications and Systems, 2005 2nd International Conference on*, Noviembre 2005.
- [133] J. C. Ikuno, M. Wrulich, y M. Rupp, “Performance and Modeling of LTE H-ARQ,” en *International ITG Workshop on Smart Antennas WSA*, 2009.
- [134] 3GPP, “OFDM-HSDPA System level simulator calibration,” en *R1-040500*.
- [135] 3GPP, “E-UTRA; UE conformance specification; radio transmission and reception; Part 1: Conformance testing,” en *TS 36.521*.
- [136] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, y M. Rupp, “Simulating the Long Term Evolution Physical Layer,” en *European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*, Agosto 2009.
- [137] G. Gómez, D. Morales-Jiménez, J. J. Sánchez-Sánchez, y T. Entrambasaguas, “A Next Generation Wireless Simulator Based on MIMO-OFDM: LTE Case Study,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- [138] 3rd Generation Partnership Project, “TS 36.300 V. 10.9.0; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10), 2013.” Reporte técnico, 2013.
- [139] “3GPP TS 36.213, Physical layer procedures,” Septiembre 2009.
- [140] “3GPP TR 36.942, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios,” Julio 2009.