

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

---

# Algoritmos de planificación del control de potencia y estimación de capacidad en redes LTE

---

*Autor:*

JOSÉ ÁNGEL FERNÁNDEZ SEGOVIA

*Directores:*

DR. SALVADOR LUNA RAMÍREZ

DR. MATÍAS TORIL GENOVÉS

24 de junio de 2015



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: José Ángel Fernández Segovia  
 <http://orcid.org/0000-0003-0832-458X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:  
Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):  
[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)  
Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización  
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.  
No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer  
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de  
Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





**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. \_\_\_\_\_

Vocales: Dr. D. \_\_\_\_\_

Dr. D. \_\_\_\_\_

Dr. D. \_\_\_\_\_

para juzgar la Tesis Doctoral titulada “*Algoritmos de planificación del control de potencia y estimación de capacidad en redes LTE*” realizada por D. José Ángel Fernández Segovia y dirigida por el Dr. D. Salvador Luna Ramírez y 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:

El Vocal:

El Vocal:

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

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

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



*“La perfección se consigue, no cuando no haya más que añadir, sino cuando no hay nada más por quitar.”*

Antoine de Saint-Exupéry.

Fuente: L'Avion, Cap. III





# Agradecimientos

Sin atisbo alguno de duda tengo que agradecer en primer lugar el apoyo a mi familia (mamá, papá, Noelia y, como no, M<sup>a</sup> José).

No pueden quedar fuera de los agradecimientos todos y cada uno de mis compañeros a lo largo de estos años, que han influido en mi trabajo y me han hecho crecer personal y profesionalmente. A mis compañeros en la universidad: Víctor, Rocío, Jose María, Pablo - sin duda el peor... -, Ana Belén, Antonio, Almudena, Juanmi, Inma, Pablo Doc., Isa, Ana, Emil, Juan - el que maneja el cotarro -, Lydia, Alex y Sergio - el *chairman* -, y a mis compañeros de trabajo en Ericsson: Carlos, Juan Jesús, Ángel... A todos vosotros gracias.

Y un agradecimiento especialmente importante es obligado hacia Salvador Luna y Matías Toril, mis directores de Tesis, primero por darme la oportunidad de llegar hasta este punto y, además, porque cada día desde que trabajo con ellos he aprendido algo nuevo y por inculcarme su espíritu de trabajo y mejora continua.

El trabajo presentado en esta Tesis Doctoral se ha desarrollado en el marco de un contrato de colaboración 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.



# Índice general

Agradecimientos	ix
Índice	x
Resumen	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tablas	xix
Acrónimos	xxi
Símbolos	xxv
Introducción	1
<b>1. Planificación automática de redes LTE</b>	<b>7</b>
1.1. Arquitectura de red LTE . . . . .	7
1.2. Planificación de redes móviles . . . . .	9
1.3. Planificación automática de redes móviles . . . . .	12
1.4. Conclusiones . . . . .	15
<b>2. Planificación automática del control de potencia en el enlace ascendente de LTE</b>	<b>17</b>
2.1. Introducción . . . . .	17
2.1.1. Trabajo relacionado y contribución . . . . .	18
2.2. Formulación del problema . . . . .	21
2.2.1. Problema del ajuste de parámetros del control de potencia . . . . .	22
2.2.2. Modelo de sistema . . . . .	25
2.3. Métodos de planificación . . . . .	30
2.3.1. Análisis de sensibilidad para $P_0$ y $U_{UL}$ . . . . .	31
2.3.2. Algoritmo 1: Optimización de $P_0$ y $U_{UL}$ . . . . .	32
2.3.3. Análisis de sensibilidad para $P_0$ y $\alpha$ . . . . .	34
2.3.4. Algoritmo 2: Optimización de $P_0$ y $\alpha$ . . . . .	36

2.3.5. Escenario irregular . . . . .	38
2.4. Pruebas . . . . .	45
2.4.1. Metodología experimental . . . . .	45
2.4.2. Resultados . . . . .	48
2.5. Conclusiones . . . . .	60
<b>3. Estimación de capacidad en redes LTE multiservicio</b>	<b>61</b>
3.1. Introducción . . . . .	61
3.2. Predicción de congestión en el canal de control DL de LTE . . . . .	63
3.2.1. Formulación del problema y trabajo relacionado . . . . .	64
3.2.2. Descripción del PDCCH . . . . .	67
3.2.3. Modelo analítico del PDCCH . . . . .	70
3.2.4. Pruebas . . . . .	75
3.2.4.1. Metodología experimental . . . . .	75
3.2.4.2. Resultados . . . . .	80
3.2.5. Conclusiones . . . . .	85
3.3. Estimación de capacidad de celda en redes LTE multiservicio . . . . .	87
3.3.1. Formulación del problema y trabajo relacionado . . . . .	87
3.3.2. Método de estimación de la capacidad de una celda LTE con múltiples servicios . . . . .	90
3.3.2.1. Ecuaciones de regresión . . . . .	91
3.3.2.2. Estimación de la capacidad de celda . . . . .	94
3.3.3. Pruebas . . . . .	95
3.3.3.1. Metodología experimental . . . . .	95
3.3.3.2. Resultados . . . . .	97
3.3.4. Conclusiones . . . . .	103
<b>4. Conclusiones Finales</b>	<b>105</b>
4.1. Contribuciones . . . . .	105
4.1.1. Planificación automática del control de potencia en LTE . . . . .	106
4.1.2. Estimación de la capacidad de celda en redes LTE . . . . .	107
4.2. Líneas Futuras . . . . .	108
4.2.1. Planificación automática del control de potencia en LTE . . . . .	108
4.2.2. Estimación de la capacidad de celda en redes LTE . . . . .	110
4.3. Lista de Publicaciones . . . . .	110
<b>A. Herramienta de simulación para el canal ascendente de LTE</b>	<b>113</b>
A.1. Características del canal ascendente en LTE . . . . .	113
A.2. Funcionalidad del simulador . . . . .	115
A.2.1. Nivel físico . . . . .	117
A.2.2. Nivel de enlace . . . . .	118
A.2.3. Nivel de red . . . . .	122
A.3. Análisis de sensibilidad de parámetros del ULPC . . . . .	124





# Resumen

Las tareas de planificación son de vital importancia en las redes de comunicaciones móviles. En la etapa de planificación, se realiza el diseño y dimensionado de la red atendiendo a criterios preestablecidos de cobertura, calidad de servicio y coste. Una adecuada planificación permite aprovechar la capacidad de los equipos de los que se dispone mediante una configuración óptima de sus parámetros. Al mismo tiempo, una planificación correcta permite detectar posibles cuellos de botella antes de que éstos ocurran. Con ello, se evitan problemas durante la fase de operación, minimizando (o, al menos, retrasando) las consiguientes inversiones de capital.

En los últimos años, las tareas de planificación en las redes de acceso móvil se han complicado por el aumento del tamaño y la complejidad de estas redes. El problema se agrava con la continua inclusión de nuevos terminales, servicios y funcionalidades en las redes móviles. Para afrontar este problema, los operadores demandan herramientas automáticas de planificación que aprovechen las medidas de rendimiento extraídas de la red mediante técnicas de redes autoorganizadas (Self-Organizing Networks, SON).

En esta tesis se proponen diversos algoritmos de planificación automática para la red de acceso radio Long Term Evolution (LTE). Todos ellos han sido concebidos para su integración en una herramienta de planificación comercial, por lo que se ha prestado especial atención a su eficiencia de computación.

Por un lado, se proponen dos algoritmos de configuración automática de parámetros del control de potencia en el canal compartido de datos del enlace ascendente de LTE (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH). El objetivo de ambos algoritmos es maximizar la cobertura y capacidad del PUSCH en una red LTE. A diferencia de propuestas anteriores, los algoritmos de planificación que se proponen manejan escenarios irregulares con baja carga de computación y consideran

el rendimiento del control de potencia tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. Para su validación, se ha utilizado un simulador estático de nivel de sistema ajustado con datos de una red LTE real.

Por otro lado, se describe un algoritmo de estimación de la capacidad del canal de control en el enlace descendente (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) en LTE. El algoritmo propuesto se basa en un modelo de teoría de colas que permite estimar la probabilidad de congestión del PDCCH de una celda concreta a partir de estadísticas de red. Dicho algoritmo se ha validado con medidas de redes LTE reales.

Por último, se propone un algoritmo de estimación de la capacidad de tráfico de usuario de una celda LTE mediante estadísticas de rendimiento de red. El algoritmo descrito aplica técnicas de regresión multivariable para identificar las variables que determinan la capacidad de celda y establecer una relación cuantitativa entre ellas. A diferencia de estudios previos, el método propuesto es capaz de manejar restricciones de calidad de servicio para múltiples servicios. El método se ha validado mediante estadísticas de rendimiento extraídas de las primeras redes LTE multiservicio.



# Índice de figuras

1.1. Arquitectura de red LTE. . . . .	8
1.2. Proceso de planificación de red. . . . .	11
1.3. Planificación automática de parámetros en una estructura SON centralizada. . . . .	14
1.4. Detección de problemas de capacidad en una estructura SON distribuida. . . . .	15
1.5. Proceso de planificación de red. . . . .	16
2.1. Control de potencia para diferentes terminales en un eNB. . . . .	23
2.2. Escenario regular en el análisis de sensibilidad de parámetros. . . . .	31
2.3. Tasa de datos en escenario regular con $P_0$ y $U_{UL}$ uniformes. . . . .	32
2.4. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización de $P_0$ y $U_{UL}$ . . . . .	35
2.5. Tasa de datos en escenario regular con $P_0$ y $\alpha$ uniformes. . . . .	37
2.6. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización para $P_0$ y $\alpha$ . . . . .	39
2.7. Regularización del escenario basada en adyacentes. . . . .	43
2.8. Planificación de un escenario irregular según método AA. . . . .	44
2.9. <i>Escenario 1</i> . . . . .	46
2.10. <i>Escenario 2</i> . . . . .	48
2.11. Rendimiento global del <i>Escenario 1</i> con configuración uniforme de parámetros $P_0$ y $U_{UL}$ . . . . .	49
2.12. Rendimiento global de la red con el <i>Algoritmo 1</i> . . . . .	51
2.13. Comparación de soluciones para el <i>Algoritmo 1</i> . . . . .	53
2.14. Solución MeM para el <i>Algoritmo 1</i> . . . . .	54
2.15. Rendimiento global del <i>Escenario 2</i> con configuración uniforme de los parámetros $P_0$ y $\alpha$ . . . . .	55
2.16. Rendimiento global de la red con el <i>Algoritmo 2</i> . . . . .	56
2.17. Comparación de soluciones para el <i>Algoritmo 2</i> . . . . .	58
2.18. Solución MeM para el <i>Algoritmo 2</i> . . . . .	59
3.1. Estructura OFDM de recursos radio en LTE. . . . .	69
3.2. Modelo de cola del PDCCH. . . . .	71
3.3. Diagrama de estados del modelo propuesto. . . . .	72
3.4. Matriz generadora, $\mathbf{Q}$ . . . . .	74
3.5. Comparación entre el modelo analítico y el simulador del PDCCH. . . . .	81
3.6. Comparación entre modelo analítico y el PDCCH en celdas LTE reales. . . . .	83

3.7. Aplicación del modelo sobre grupo de celdas en Red A. . . . .	85
3.8. Aplicación del modelo sobre grupo de celdas en Red B. . . . .	86
3.9. Diagrama de flujo para la estimación de capacidad de celda. . . . .	90
3.10. Variación del coeficiente de determinación durante el proceso de eliminación de variables. . . . .	100
3.11. $TH_{QCI}^{(8)}$ en función del CQI y el BW. . . . .	102
3.12. Función de distribución del número medio máximo de usuarios ac- tivos en el DL por celda. . . . .	103
A.1. Estructura de asignación de recursos radio en LTE. . . . .	114
A.2. Diagrama de flujo del simulador del enlace ascendente de LTE. . . . .	115
A.3. Escenario real con límites costeros determinados por el simulador. . . . .	118
A.4. Comparación del histograma de RSRP del simulador y la red real. El pequeño desplazamiento entre las funciones de distribución pone de manifiesto el buen ajuste del modelo. . . . .	126
A.5. Relación entre indicadores de capacidad, cobertura e interferencia para barrido de la potencia nominal, $P_0$ . . . . .	127
A.6. Relación entre indicadores de capacidad, cobertura e interferencia para barrido del factor de compensación de pérdidas, $\alpha$ . . . . .	128

# Índice de tablas

2.1. Parámetros de simulación. . . . .	33
3.1. Formatos de PDCCH. . . . .	69
3.2. Parámetros de la herramienta de simulación del PDCCH. . . . .	76
3.3. Estadísticas de rendimiento del PDCCH en las celdas estudiadas. . . . .	78
3.4. Estadísticas de rendimiento del PDCCH en Red A y Red B. . . . .	79
3.5. Comparación entre el modelo analítico y el simulador del PDCCH. . . . .	80
3.6. Comparación entre el modelo analítico y el PDCCH en celdas reales. . . . .	82
3.7. Características de QCI estandarizados. . . . .	88
3.8. Estadísticas de rendimiento de la red considerada. . . . .	98
3.9. Resultados del modelo de regresión completo. . . . .	98
3.10. Resultados para el modelo simplificado. . . . .	101
A.1. Parámetros de simulación. . . . .	116
A.2. Parámetros de simulación. . . . .	125



# Acrónimos

<b>3GPP</b>	<b>3rd Generation Partnership Project</b>
<b>AA</b>	<b>Adjacency-based Approximation</b>
<b>AC</b>	<b>Admission Control</b>
<b>AM</b>	<b>Acknowledged Mode</b>
<b>ANR</b>	<b>Automatic Neighbor Relation</b>
<b>BLER</b>	<b>BLock Error Rate</b>
<b>BW</b>	<b>BandWidth</b>
<b>CCE</b>	<b>Control Channel Elements</b>
<b>CCO</b>	<b>Coverage and Capacity Optimization</b>
<b>CDF</b>	<b>Cumulative Distribution Function</b>
<b>CFI</b>	<b>Control Format Indicator</b>
<b>CLPC</b>	<b>Closed-Loop Power Control</b>
<b>CM</b>	<b>Configuration Management settings</b>
<b>CQI</b>	<b>Channel Quality Indicator</b>
<b>DAS</b>	<b>Distributed Antenna System</b>
<b>DCI</b>	<b>Downlink Control Information</b>
<b>DL</b>	<b>DownLink</b>
<b>DS</b>	<b>Dynamic Scheduling</b>
<b>eNB</b>	<b>evolved Node-B</b>
<b>EPC</b>	<b>Evolved Packet Core</b>
<b>E-UTRAN</b>	<b>Evolved UMTS Radio Access Network</b>
<b>FCFS</b>	<b>First Come First Served</b>
<b>FM</b>	<b>Full Model</b>
<b>FPC</b>	<b>Fractional Power Control</b>

<b>GBR</b>	<b>Guaranteed Bit Rate</b>
<b>GSM</b>	<b>Global System for Mobile communications</b>
<b>HARQ</b>	<b>Hybrid Automatic Repeat Request</b>
<b>HSDPA</b>	<b>High-Speed Downlink Packet Access</b>
<b>HSPA</b>	<b>High-Speed Packet Access</b>
<b>HSS</b>	<b>Home Subscriber Server</b>
<b>IMS</b>	<b>IP Multimedia Subsystem</b>
<b>IP</b>	<b>Internet Protocol</b>
<b>iRAT</b>	<b>inter-Radio Access Technology</b>
<b>LA</b>	<b>Link Adaption</b>
<b>LB</b>	<b>Load Balancing</b>
<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution</b>
<b>M2M</b>	<b>Machine-to-Machine</b>
<b>MaM</b>	<b>Maximum Method</b>
<b>MeM</b>	<b>Mean Method</b>
<b>MiM</b>	<b>Minimum Method</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MME</b>	<b>Mobility Management Entity</b>
<b>MRA</b>	<b>Mean Radius Approximation</b>
<b>MS-MLR</b>	<b>Multi-Service Multiple Linear Regression</b>
<b>MxM</b>	<b>Mixed Method</b>
<b>NMS</b>	<b>Network Management System</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frecuency Division Multiplexing</b>
<b>OFDMA</b>	<b>OFDM Access</b>
<b>OLPC</b>	<b>Open-Loop Power Control</b>
<b>PAPR</b>	<b>Peak-to-Average Power Ratio</b>
<b>PCFICH</b>	<b>Physical Control Format Indicator CHannel</b>
<b>PCRF</b>	<b>Policy and Charging Rules Function</b>
<b>PDCCH</b>	<b>Physical Downlink Control CHannel</b>
<b>PDCP</b>	<b>Packet Data Convergence Protocol</b>
<b>PDSCH</b>	<b>Physical Downlink Shared CHannel</b>

<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>PHICH</b>	<b>P</b> hysical <b>H</b> ARQ <b>I</b> ndicator <b>C</b> Hannel
<b>PL</b>	<b>P</b> ropagation <b>L</b> osses
<b>PM</b>	<b>P</b> erformance <b>M</b> easurements
<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>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>QCI</b>	<b>Q</b> oS <b>C</b> lass <b>I</b> dentifier
<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>RE</b>	<b>R</b> esource <b>E</b> lement
<b>REG</b>	<b>R</b> esource <b>E</b> lement <b>G</b> roups
<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>SC-OFDMA</b>	<b>S</b> ingle <b>C</b> arrier - <b>O</b> FDMA
<b>SDCCH</b>	<b>S</b> tandalone <b>D</b> edicated <b>C</b> ontrol <b>C</b> Hannel
<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 <b>N</b> oise <b>R</b> atio
<b>SM</b>	<b>S</b> implified <b>M</b> odel
<b>SON</b>	<b>S</b> elf- <b>O</b> rganizing <b>N</b> etworks
<b>SPS</b>	<b>S</b> emi- <b>P</b> ersistent <b>S</b> cheduling
<b>SR</b>	<b>S</b> cheduling <b>R</b> equest
<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> odes

---

<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>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>VoLTE</b>	<b>V</b> oice over <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



# Símbolos

$P_0$	Potencia nominal de ULPC en el PUSCH	dBm
$\alpha$	Factor de compensación de PL	-
$U_{UL}$	Carga de celda en UL	%
$N_{v_{P_0}}$	Nº de posibles valores diferentes para $P_0$	-
$N_{v_\alpha}$	Nº de valores diferentes para $\alpha$	-
$N_{v_{U_{UL}}}$	Nº de valores diferentes para $U_{UL}$	-
$N_c$	Nº de celdas a planificar	-
$P_{tx_{max}}$	Potencia de transmisión máxima del UE	dBm
$PL$	Pérdidas de propagación radio considerando ganancia de antena	dB
$\Delta_{TF}$	Variación de potencia por comandos TF	dBm
$\Delta_{TPC}$	Variación de potencia por comandos TPC	dBm
$M(k)$	Nº de PRB asignados al UE $k$ en el PUSCH	-
$M_{min}$	Nº mínimo de PRB asignables a un UE	-
$M_{max}$	Nº máximo de PRB asignables a un UE	-
$k$	Nº de identificación de UE	-
$S(k)$	Celda servidora del usuario $k$	-
$P_{TX}(k)$	Potencia transmitida por el UE $k$	dBm
$I_{UL}$	Interferencia media en el PUSCH de una celda LTE	dBm
$N_{TH}$	Nivel de ruido térmico	dBm
$N_u$	Nº de usuarios	-
$A$	Puntos en el área de servicio de un celda LTE	-
$N$	Listado de adyacentes de una celda LTE	-
$SINR_{th}$	Valor umbral de SINR	dB

$TH_{perPRB}$	<i>Throughput</i> por PRB	kbps
$TH_{perPRB_{max}}$	<i>Throughput</i> máximo obtenible por PRB	kbps
$\beta$	Corrección en la fórmula de Shannon truncada	-
$SINR_{min}$	Valor mínimo de SINR	dB
$SINR_{max}$	Valor máximo de SINR	dB
$TH_{avg}$	<i>Throughput</i> de usuario promedio de celda	kbps
$TH_{ce}$	<i>Throughput</i> de usuario de borde de celda	kbps
$d$	distancia	m
$TH_{ce,min}$	Umbral mínimo de $TH_{ce}$	kbps
$NR_{UL}$	Relevancia de una celda adyacente	dB
$L$	Pérdidas de propagación radio	dB
$A_V$	Ganancia vertical de antena	dB
$A_H$	Ganancia horizontal de antena	dB
$N_r$	Nº de celdas adyacentes relevantes	-
$N_{r_c}$	Nº de celdas adyacentes coubicadas relevantes	-
$N_{r_{nc}}$	Nº de celdas adyacentes no coubicadas relevantes	-
$N_c$	Número de subproblemas de optimización locales	-
$N_{neigh}$	Número de vecinas	-
$R_{TH_{ce,min}}$	Ratio de celdas cuyo $TH_{ce} > TH_{ce,min}$	-
$t_f$	Formato del PDCCH	-
$CCE_f(t_f)$	Nº de CCE usados por formato $t_f$	-
$N_g$	Variable que determina número de grupos en PHICH	-
$N_{CCE}$	Nº de CCE disponibles	-
$N_S$	Nº total de estados	-
$\lambda_i$	Intensidad de tráfico para cada $t_f$	Erlang
$\lambda_T$	Intensidad de tráfico para todos los $t_f$	Erlang
$\mu_{i,n}$	Tasa de servicio para cada $i = t_f$ en cada estado	$s^{-1}$
$n$	Nº de estado del modelo de Markov	-
$k_{m,t_f}$	Nº de llegadas con formato $t_f$ en la combinación $m$	-
$P(t_f)$	Probabilidad de tráfico entrante con formato $t_f$	-
$P(n, m)$	Probabilidad de que la m-ésima combinación resulte	-

	en la ocupación del estado $n$	
$M(n)$	Nº de combinaciones posibles que llevan al estado $n$	-
$\mathbf{Q}$	Matriz generadora infinitesimal	-
$\mathbf{e}$	Vector de error	-
$\mathbf{\Pi}$	Vector de probabilidades en régimen estacionario	-
$\rho$	Ocupación media del sistema	[ %]
$\mathbf{CQI}_{th}$	Vector de umbrales de CQI para LA	-
$N_b$	Nº de bins	-
$b_{CCE}$	Índice de bins histograma CCE	-
$b_{CQI}$	Índice de bins histograma CQI	-
$e$	Error de estimación	-
$\lambda_{PDCCH,UL}$	Intensidad de tráfico en PDCCH por asignaciones en UL	Erlang
$\lambda_{PDCCH,DL}$	Intensidad de tráfico en PDCCH por asignaciones en DL	Erlang
$N_{eq}$	Nº de ecuaciones	-
$p_{QoS}^{(j,l)}(c, h)$	Valor del $l$ -ésimo indicador de QoS del servicio con QCI $j$ en la celda $c$ y la hora $h$	-
$p_i$	Variables independientes candidatas a formar parte de la ecuación de regresión	-
$\beta_i^{(j,l)}$	Coefficiente de regresión para cada variable independiente $p_i$	-
$\epsilon^{(j,l)}(c, h)$	Término de error de la celda $c$ y la hora $h$	-
$k(j, l)$	Nº de variables independientes para el modelo de QCI $j$ e indicador de QoS $l$	-
$P_{QoSTarget}^{(j,l)}$	Objetivo del indicador de calidad $l$ -ésimo y QCI $j$	-
$\hat{\beta}_i^{(j,l)}$	Estimas de los coeficientes de regresión	-
$CC(c)$	Capacidad de celda $c$	-



# Introducción

En este capítulo inicial se introduce el trabajo realizado en esta Tesis. En primer lugar, se expone la motivación que da lugar al estudio de los métodos de planificación automática aquí desarrollados. A continuación, se plantean los objetivos de investigación y la metodología de trabajo seguida en cada una de las contribuciones originales aportadas. Por último, se presenta la estructura del presente documento.

## Motivación

Las tecnologías de telecomunicación en el siglo XXI tienen su punta de lanza en las comunicaciones móviles. El impulso de la industria y las instituciones a las labores de investigación en este sector ha favorecido la aparición de nuevos servicios y tecnologías cada vez más sofisticadas. En la actualidad, la tecnología *Long Term Evolution* (LTE) desarrollada por el *3rd Generation Partnership Project* 3GPP [1] se está implantando a nivel mundial. Descrita por primera vez en [2], LTE promete mejorar el rendimiento de sistemas de comunicaciones móviles predecesores con mayores tasas de transmisión de datos, menor latencia y consumo de potencia, flexibilidad en el uso del espectro radioeléctrico y una arquitectura de red simplificada [3].

En este marco de evolución continua, los operadores deben adquirir nuevos conocimientos y destrezas para acometer las labores de diseño de sus redes con garantías de éxito. Como consecuencia, los operadores deben replantear los procedimientos empleados para gestionar sus redes. En el pasado, los procesos de planificación y optimización de red se realizaban de forma manual. Por ello, era habitual sobredimensionar los recursos de la red para evitar la necesidad de ampliarlos frecuentemente. Con el aumento del tamaño y la complejidad de las redes

móviles, la gestión manual de la red ha dejado de ser viable. En paralelo, la agresiva competencia entre operadores ha obligado a reducir la inversión en equipamiento, haciendo necesario un proceso de dimensionamiento de los recursos más cuidado. En este contexto, surge la necesidad de disponer de herramientas que permitan la configuración automática de parámetros y la estimación precisa de la capacidad de cada uno de los elementos de una red LTE.

El problema de la gestión automática se ha convertido en uno de los temas centrales de las redes móviles, como prueba la extensa bibliografía sobre el tema [4–9]. Esto justifica el esfuerzo de diversos foros industriales y organismos de estandarización por especificar las capacidades de funcionamiento automático de las redes móviles, agrupadas bajo el término SON (*Self-Organizing Networks*) [10, 11]. La funcionalidad de SON hace referencia a la capacidad de la red de planificarse, configurarse, optimizarse y recuperarse de fallos de forma automática.

Para poder realizar el dimensionado de la red de forma automática, es preciso disponer de modelos de rendimiento que permitan estimar la capacidad de los distintos elementos de la red. En redes LTE, esta estimación de capacidad se complica por diversas razones. La diversidad de servicios y la existencia de procesos de adaptación del enlace causan que el número de usuarios que puede servir una celda dependa de las condiciones de tráfico, propagación e interferencia específicas de cada celda. Además, la mayor flexibilidad del proceso de asignación de recursos radio lleva aparejado un incremento del tráfico de señalización, que convierte a los canales de control en un cuello de botella [12].

Una vez desplegada la red, es necesario fijar la configuración inicial de los parámetros de los algoritmos que se ejecutan en ella. Entre los algoritmos de LTE, destaca por su importancia el control de potencia en el enlace descendente [3]. El control de potencia determina la calidad de servicio experimentada por el usuario, influyendo al mismo tiempo en la duración de la batería del terminal. Para aumentar su flexibilidad, el algoritmo estandarizado por el 3GPP [13] contiene varios parámetros que pueden ajustarse celda a celda, y que, por tanto, pueden ser objeto de planificación.

Este trabajo se ubica dentro del ámbito de la planificación y configuración automática de redes LTE. Por un lado, se aborda el problema de la estimación de la capacidad de datos de usuario y señalización con estadísticas de rendimiento

de la red. Por otro lado, se estudia el problema de la configuración automática de parámetros del control de potencia en redes LTE.

## 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 (re)planificación de los parámetros del control de potencia del canal ascendente de datos en redes LTE, para encontrar la mejor configuración de estos parámetros, y
- b) desarrollar métodos de estimación de la capacidad de una celda para transmitir datos de usuario y señalización, que permitan la detección de cuellos de botella en la red.

Las principales contribuciones de esta Tesis son:

- a) dos algoritmos heurísticos de replanificación automática para los parámetros principales del control de potencia en el enlace ascendente de LTE, que manejan escenarios irregulares y consideran el funcionamiento del control de potencia en lazo abierto y en lazo cerrado con baja carga computacional,
- b) un modelo analítico del canal de control del enlace descendente de LTE, basado en teoría de colas y ajustable mediante estadísticas de red, que permite estimar la distribución de uso de este canal, y
- c) una metodología para estimar la capacidad de celda en redes LTE multiservicio, basada en un modelo de regresión lineal multivariable construido con datos de configuración y rendimiento de la red, que es capaz de tener en cuenta simultáneamente las restricciones de calidad de los distintos servicios.

Es habitual que, en el contexto académico, la mayoría de los trabajos se centren en los aspectos más teóricos de la investigación, relegando a un segundo plano la aplicación práctica de sus propuestas. Una característica distintiva de esta Tesis

es su aplicabilidad práctica, que viene condicionada por el marco de financiación a través de una empresa (Ericsson) en el que se ha desarrollado esta Tesis. Cada uno de los problemas analizados en este trabajo ha sido planteado desde una perspectiva eminentemente práctica, tal como lo haría el operador y el proveedor de herramientas. Así, como restricción de partida, todos los métodos propuestos deben de ser lo suficientemente sencillos como para ser incluidos en una herramienta de planificación comercial sin comprometer su eficiencia computacional. Además, todos los métodos deben diseñarse y validarse a partir de datos de redes LTE reales. En este sentido, la colaboración con Ericsson ha facilitado el acceso a los datos de configuración y rendimiento de redes de distintos continentes. Esta información, sin la cual no habría sido posible realizar esta Tesis, es una de las principales fortalezas de este trabajo.

## Metodología de trabajo

Es habitual que en los trabajos de investigación se comience con una descripción cualitativa donde se trata de contextualizar y formular el problema a estudiar. Tras realizar una descripción básica del problema, se recorre de forma detallada la literatura existente relacionada con el problema propuesto. Se busca así analizar las propuestas anteriores para identificar sus carencias, de forma que se pueda aportar una nueva solución al problema. En el caso particular de los problemas de las redes de comunicaciones móviles, se suele realizar una formulación analítica del problema para después aplicar algún método de resolución clásica tomado de problemas similares. Posteriormente, la calidad de las soluciones generadas se valora con una herramienta de simulación que modela las principales funciones de la red. Durante el proceso de validación, se realizan simplificaciones en beneficio de la facilidad de implementación y la eficiencia computacional. Como último paso, se implementa la solución en una aplicación que trabaje directamente sobre la red real y se evalúa el beneficio que aporta la solución propuesta en la misma.

La metodología seguida para los diferentes problemas de investigación en esta Tesis es la descrita anteriormente. No obstante, existen ciertas peculiaridades que merece la pena comentar:



- a) Las soluciones propuestas en este trabajo están orientadas a su implementación en una herramienta de planificación comercial. Por tanto, en todos los casos se busca disminuir el coste computacional de los algoritmos propuestos.
- b) Las soluciones de los diferentes problemas se evalúan del modo más realista posible. Así, los simuladores empleados se calibran con datos de configuración y medidas tomadas de la red real. De igual manera, siempre que es posible, las soluciones propuestas se construyen o comparan con medidas de rendimiento tomadas de una red real.
- c) Tanto para el funcionamiento como para la validación de las soluciones propuestas, se han utilizado datos de configuración y rendimiento de red reales. Para facilitar la presentación y utilización de datos de redes reales se utilizan datos reales de configuración y rendimiento de red. Para construir estos juegos de datos, se usan diversas herramientas comerciales que ayudan a procesar los datos en crudo suministrados por el operador, para su estructuración en tablas que puedan ser almacenadas en bases de datos. Para extraer la información en el formato adecuado, es necesario construir las sentencias en lenguaje de consulta de datos estructurados (*Structured Query Language*, SQL). El estudio de la información suministrada por el fabricante, la construcción de las bases de datos, la programación de las sentencias y el manejo de la información resultante han sido tareas importantes en el desarrollo de esta Tesis.

## Estructura del documento

Como se puede deducir de los objetivos planteados en esta Tesis, este documento se organiza en dos partes, una por cada objetivo.

En el Capítulo 1 se presenta el marco conceptual de esta Tesis. La idea es contextualizar el problema de la planificación automática de red, además de explicar conceptos básicos sobre LTE para facilitar el seguimiento del resto de capítulos.

Los Capítulos 2 y 3 corresponden a los diferentes objetivos. El Capítulo 2 aborda desarrollo de algoritmos de planificación automática para el control de potencia del enlace ascendente de LTE, mientras que el Capítulo 3 se centra en el desarrollo de metodologías de estimación de capacidad para la detección de cuellos de botella en el sistema. El Capítulo 3 se divide a su vez en dos secciones,

centradas en la estimación de capacidad en el canal de control y la estimación de la capacidad de celda en redes LTE multiservicio, respectivamente.

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

Finalmente, en el Apéndice A se cuenta con detalle la herramienta de simulación utilizada para la evaluación de los algoritmos propuestos en el Capítulo 2.

# Capítulo 1

## Planificación automática de redes LTE

En este primer capítulo se introduce el problema de la planificación automática de redes LTE. En primer lugar se describe la arquitectura básica de las redes LTE y su funcionalidad básica. A continuación se presentan los conceptos básicos de planificación y automatización de la planificación de redes celulares. Finalmente, se concluye con una reflexión que introduce los problemas estudiados en la Tesis.

### 1.1. Arquitectura de red LTE

El estándar LTE aparece en el año 2007 [2] como un nuevo sistema de comunicaciones móviles que prometía mejorar a todos los anteriores en prestaciones, además de simplificar la arquitectura de red. En la bibliografía, el término LTE se asocia con la red de acceso radio evolucionada del sistema universal de telecomunicaciones móviles (*Evolved Universal Mobile Telecommunications System -UMTS-Radio Access Network*, E-UTRAN), mientras que se usa el término red central evolucionada (*Evolved Packet Core*, EPC) para referirse a la red troncal de transporte de LTE. En la Figura 1.1 se muestra la arquitectura básica de una red LTE, donde se resaltan los elementos que pertenecen a la E-UTRAN y a la EPC, junto con las interfaces implicadas.

En la E-UTRAN, los equipos de usuario (*User Equipment*, UE) son los encargados de proveer al usuario de una interfaz para acceder a los servicios sobre la red

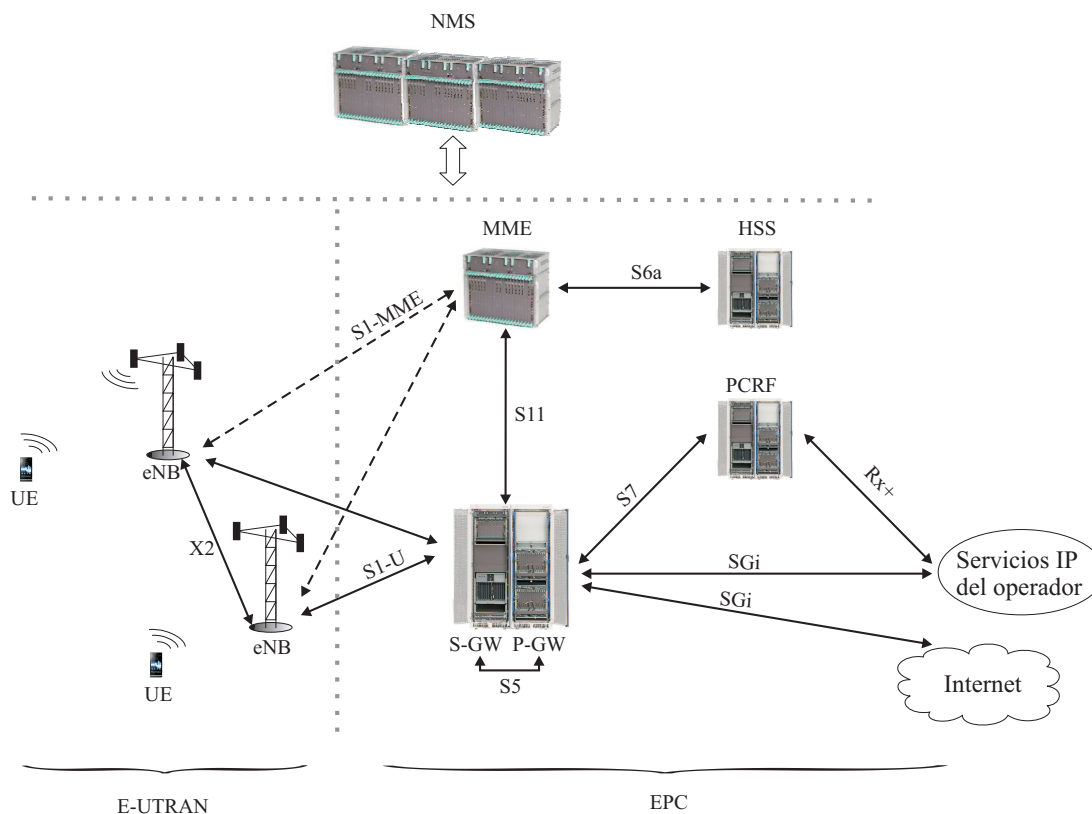


FIGURA 1.1: Arquitectura de red LTE.

de comunicaciones móviles LTE. Los UE se comunican con las estaciones base de LTE (*evolved-NodeB*, eNB) a través de la interfaz radio. Por dicha interfaz viajan tanto los datos de usuario como los datos de control. Los datos de control permiten la configuración del enlace radio en ambas direcciones (ascendente, del UE al eNB, y descendente, del eNB al UE), mediante el intercambio de parámetros de conexión o de protocolos, como el control de potencia del terminal o la modulación usada en cada dirección del enlace. En el caso de LTE, a diferencia de tecnologías anteriores, se dota al eNB de mayor funcionalidad, siendo éste el encargado de manejar la mayor parte de la gestión de recursos radio. Para ello, se elimina la figura del controlador de estaciones base (*Radio Network Controller*, RNC), necesario en UMTS. Por su parte, los eNB se comunican entre ellos mediante la interfaz X2, que permite que la gestión de los trasposos de llamadas y la coordinación entre eNB se lleve a cabo por el eNB, sin necesidad, en la mayoría de los casos, de que intervengan capas superiores. La comunicación entre la E-UTRAN y la EPC se realiza sobre la interfaz S1, de forma que los eNB se comunican en los planos de control y datos con los elementos de la EPC.

En la EPC se encuentran la entidad de gestión de movilidad (*Mobility Management Entity*, MME), que es la encargada de procesar la información de señalización entre los usuarios y la red troncal, y las pasarelas de servicios (*Serving GateWay*, S-GW), encargada de la gestión de todos los usuarios como punto de transición entre la E-UTRAN y la EPC, y datos (*Packet Data Network GateWay*, P-GW) que comunica con los diferentes servicios de conmutación de paquetes sobre el protocolo de Internet (*Internet Protocol*, IP) que ofrece el operador. También en la EPC se encuentran el servidor de suscripción local (*Home Subscriber Server*, HSS), encargado de las funciones de registro y autenticación de los usuarios por parte del operador, o, más importante si cabe, el equipo encargado de la función de control de las reglas y políticas de calidad de servicio del operador (*Policy and Charging Rules Function*, PCRF).

En la Figura 1.1 también aparece el sistema de gestión de red (*Network Management System*, NMS). Esta entidad, que no es nueva en LTE pues ya estaba presente en tecnologías anteriores, tiene la función de monitorizar todos los elementos de la red LTE. En dicha entidad de red se recogen estados de configuración y medidas de rendimiento reportados por los equipos de la red. Además, es la interfaz entre el operador y los equipos que componen la red LTE.

La arquitectura de red mostrada en la figura se diseñó para facilitar la introducción de servicios basados en *Internet Protocol* de alta tasa de transferencia de datos y baja latencia. Con este objetivo, se dota a la red LTE de una estructura no jerárquica, que reduce el número de elementos involucrados en la conexión. Por la misma razón, todas las interfaces descritas utilizan el protocolo IP.

## 1.2. Planificación de redes móviles

La planificación de red juega un papel muy importante en las redes de comunicaciones móviles hoy en día. En este tipo de redes, los objetivos de la planificación son [7]:

- 1) obtener un grado de cobertura suficiente a lo largo del área geográfica seleccionada,
- 2) garantizar una mínima capacidad de red y calidad de servicio, que asegure una baja tasa de bloqueo de llamada y tasa de pérdida de conexión al usuario, y

- 3) permitir un despliegue de la red que sea viable económicamente y permita su expansión de forma controlada durante el ciclo de vida del sistema.

Una adecuada planificación de red minimiza (o, al menos, retrasa) la inversión de capital, mejora la calidad del servicio ofrecido al usuario final (y, con ello, su satisfacción con el servicio) y reduce la necesidad de ajustes durante la fase de operación [14, 15].

El proceso de planificación de una red celular suele separar la red en dos segmentos, como son la red de transporte y la red de acceso radio.

- a) La planificación de la red de **transmisión** aborda el diseño de la infraestructura de equipamiento necesaria para enviar la información desde la estación base origen hasta el destino de dicha información (p.ej., otra estación base, internet o cualquier otro servidor de servicios). Este segmento de red puede dividirse en dos partes, en función de la lejanía a la estación base. Así, se diferencia el diseño de la red troncal, que incluye aquellos equipos de conmutación de alto nivel que conectan grandes zonas unas con otras y con los servicios ofrecidos por el operador, como puede ser la interconexión con otras redes o el acceso a internet, y, por otro lado, el diseño de la red de acceso, que conecta las estaciones base con la red troncal.
- b) La planificación **radio** comprende el diseño de la infraestructura de equipamiento que afecta a la interfaz entre las estaciones base y el terminal de usuario. Entre otros aspectos, debe cubrir la definición de las áreas de servicio de cada estación base, la interacción entre estaciones base adyacentes o la capacidad del canal radio.

La Figura 1.2 muestra las distintas fases que componen el proceso de planificación radio [7]. El proceso 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

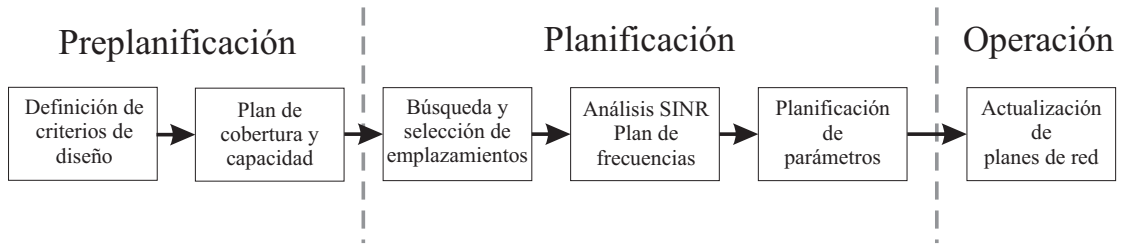


FIGURA 1.2: Proceso de planificación de red.

que permite estimar el número de emplazamientos necesarios, a partir de estimas de la capacidad que se puede obtener de una celda. A continuación, 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 de interferencia y la calidad de conexión ofrecida al usuario. Posteriormente 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.

El problema de la planificación radio se ha tratado extensamente en la bibliografía, dado que cada tecnología radio tiene su propia problemática. En *Global System for Mobile communications* (GSM), la planificación radio se centra en la estimación de la cobertura y en la asignación de frecuencias [16]. En UMTS y *High-Speed Packet Access* (HSPA), el principal obstáculo es el acoplamiento entre la cobertura, la interferencia y la capacidad de las celdas [4–6]. En LTE, se mantiene el problema del compromiso entre la cobertura y la capacidad del sistema, pero irrumpe con fuerza la planificación de parámetros radio, algo que, en anteriores tecnologías, parecía relegado a la fase de operación de red [7–9]. La causa de esta irrupción es la disponibilidad de herramientas de cálculo automáticas que permiten abordar problemas numéricos que hasta ahora no se podían resolver de forma manual.

Las herramientas de planificación disponibles hoy en día facilitan la actualización de los planes construidos en la fase de planificación con medidas recogidas durante la fase de operación. Este proceso se conoce como replanificación basada en medidas, por distinguirlo del proceso de optimización de red, donde no se hace

uso de los planes anteriores. Ambos procesos comparten el objetivo de mejorar la red. Sin embargo, la replanificación de red solo se realiza de forma periódica, con tiempos largos entre actuaciones, para corregir grandes desajustes, mientras que la optimización de red busca ajustar al máximo la configuración de parámetros para obtener el máximo rendimiento en todo momento. La replanificación es el paso previo a la ampliación de capacidad de la red mediante la agregación de nuevos equipos [17].

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) 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 de capacidad existan mediante técnicas de predicción y estimación avanzadas. De esta forma, el operador de red se anticipa a posibles problemas de congestión 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 del servicio. Todas estas tareas solo se pueden llevar a cabo con la ayuda de herramientas de automatización.

### 1.3. Planificación automática de redes móviles

El creciente tamaño y complejidad de las redes móviles dificulta enormemente las tareas de planificación y optimización de la red por parte del operador. Para reducir los costes de operación y eliminar los errores humanos introducidos por el manejo de la red, se plantea la automatización de todas las tareas de gestión de



red. Con este objetivo, en los últimos años se han propuesto numerosas técnicas automáticas de planificación y optimización de red, englobadas bajo el término de redes autoorganizadas (SON). Bajo este término, se agrupan todas aquellas redes que implementan capacidades de configuración, ajuste y resolución de problemas automáticas, sin intervención del operador. Aunque SON puede aplicarse a cualquier tipo de red, es en el estándar LTE donde se ha generalizado el uso de estas técnicas [10, 18].

Para el operador, los principales beneficios de la aplicación de SON se resumen en la reducción de los costes de operación de la red, la liberación del personal del operador de tareas rutinarias que han de repetirse en el espacio y/o en el tiempo, y el incremento del rendimiento y capacidad de la red, que permite retrasar las inversiones de capital para ampliar los recursos de la red. Para el usuario, la aplicación de SON conlleva mejor calidad de servicio y una reducción de las tarifas como consecuencia de los menores costes de operación.

Existen varias posibilidades de incluir funcionalidades SON en una red de comunicaciones móviles. En función de su ubicación, los sistemas SON se clasifican en centralizados y descentralizados:

- Los sistemas SON centralizados son aquellos en los que se añade un equipamiento adicional que recopila los datos necesarios del NMS, los analiza y propone cambios en la configuración de la red. Estos cambios se envían a las estaciones base a través del intercambio de información del NMS.
- Los sistemas SON descentralizados (o distribuidos) son aquellos en los que se dota a cada estación base (eNB, en LTE) de alguna funcionalidad SON, que funciona de forma independiente o coordinada con otras entidades del mismo nivel.

Con un esquema SON centralizado se pueden implementar algoritmos de re-planificación automática de parámetros radio. En la Figura 1.3 se ilustra un ejemplo de implementación de algoritmo SON centralizado para la configuración automática de parámetros del control de potencia. En este esquema, el servidor SON es el elemento de red que ejecuta el algoritmo de planificación. Dicho elemento debe conectarse al NMS, donde se recoge la información de los parámetros de configuración de red y las estadísticas de rendimiento. Toda esta información se recopila

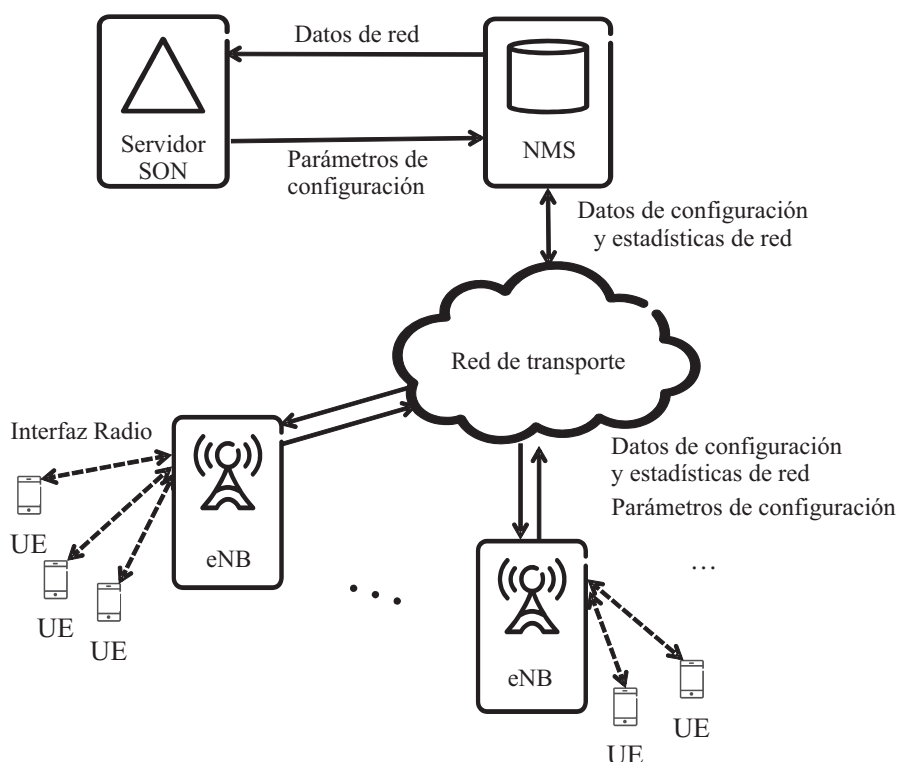


FIGURA 1.3: Planificación automática de parámetros en una estructura SON centralizada.

en el NMS gracias al envío constante de información de los UE, eNB y otras entidades de la red hacia el NMS a través de la red de transporte. El servidor SON procesa toda la información y aplica los algoritmos de planificación, que dan como resultado una nueva configuración de parámetros de red. La nueva configuración se envía en sentido inverso por el NMS a través de la red de transporte hacia los elementos de red implicados. En el ejemplo de la figura, los parámetros de configuración viajan del NMS hacia los eNB y los eNB se encargan de transmitirlos por la interfaz radio hasta los UE.

En esta estructura centralizada, el proceso de replanificación puede lanzarse cada vez que se añade un nuevo eNB en la red. En este caso, el nuevo eNB envía su localización y configuración inicial al NMS. El servidor SON, con toda la información recopilada del NMS, estudia la nueva topología y selecciona una nueva configuración de parámetros adaptada a la nueva situación. Esta nueva configuración se difunde al nuevo eNB y al resto de eNB colindantes, que deben cambiar su configuración para adaptarse a la nueva situación.

Del mismo modo, se pueden implementar algoritmos de planificación automática como parte de un sistema SON distribuido. En la Figura 1.4 se muestra el

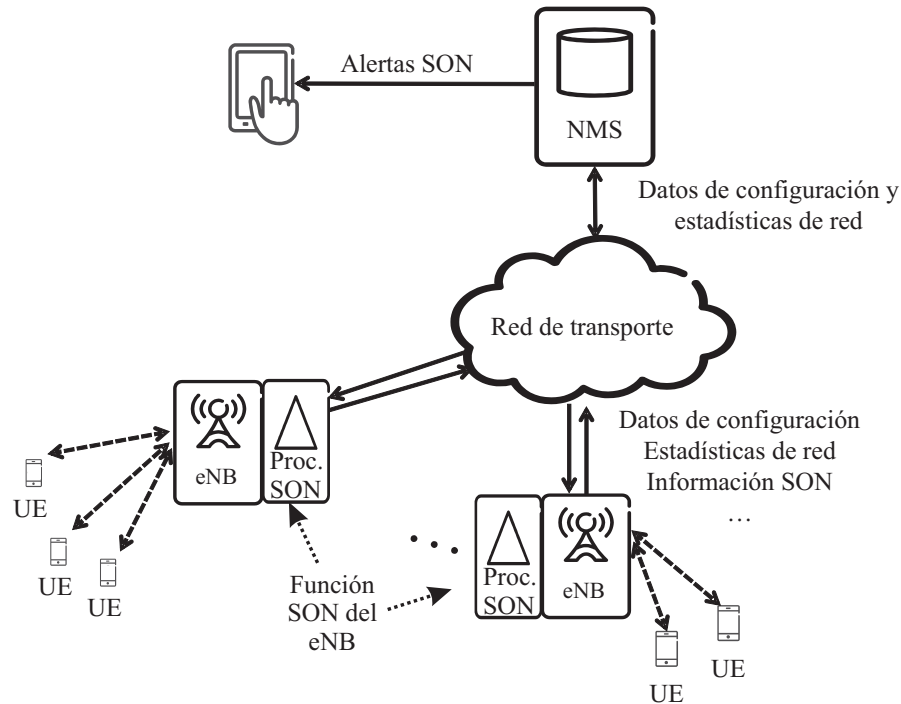


FIGURA 1.4: Detección de problemas de capacidad en una estructura SON distribuida.

esquema de una funcionalidad SON distribuida para la detección de cuellos de botella en un canal de comunicación de la interfaz radio. En este caso distribuido, cada eNB tiene capacidad de procesado SON adicional. Esta capacidad permite al eNB analizar una serie de datos históricos sobre la demanda de tráfico en un canal de comunicación. Con esta información, el eNB es capaz de predecir la evolución de la demanda y detectar la próxima superación de la capacidad máxima del canal en la celda concreta. Así, el eNB estima en cuánto tiempo el canal será un cuello de botella para el funcionamiento normal del eNB. Esa predicción se envía a través de la red de transporte al NMS. Con esta alarma, el operador puede ampliar la capacidad del canal reconfigurando sus parámetros, evitando el problema de congestión antes de que ocurra.

La decisión final de si un algoritmo de planificación automática debe realizarse de forma distribuida o centralizada depende del problema concreto. La solución distribuida suele tener un menor tiempo de respuesta y una menor carga computacional. En cambio, la solución centralizada puede abordar problemas de planificación global que requieren tener en cuenta las interacciones entre múltiples elementos. Además, la solución centralizada facilita el manejo de equipos de diferentes fabricantes.

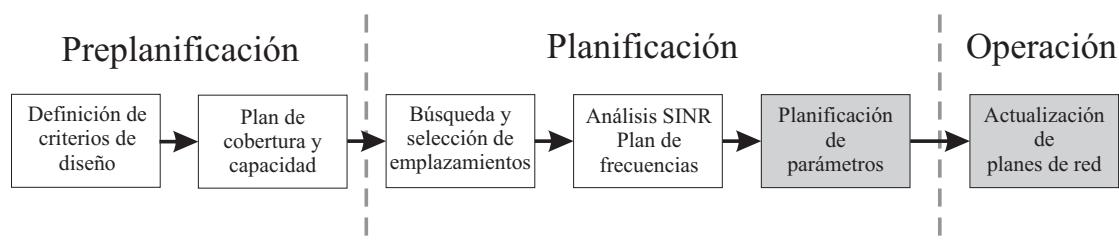


FIGURA 1.5: Proceso de planificación de red.

## 1.4. Conclusiones

En esta Tesis Doctoral se investigan distintos problemas dentro de la planificación de la interfaz radio de LTE. En este primer capítulo se ha introducido la arquitectura básica de una red LTE, describiendo las entidades principales en esta tecnología. Además, se ha descrito un marco general del proceso de planificación de una red de comunicaciones móviles. La planificación radio es de gran importancia para asegurar el buen funcionamiento de las redes de móviles y, por ello, es una de las tareas principales que involucran al operador. Para reducir la carga de trabajo que supone esta tarea, existen hoy en día herramientas automáticas de planificación de red. Aun así, la funcionalidad de estas herramientas es limitada, sobre todo para la planificación de la interfaz radio de LTE.

Debido a que la planificación radio abarca un gran abanico de posibles actuaciones, no todas ellas pueden abordarse en un sólo trabajo. La Figura 1.5 refleja a qué tarea de planificación corresponden los métodos desarrollados en esta Tesis (bloques sombreados en la figura). En el Capítulo 2 se proponen métodos de planificación automática de parámetros del control de potencia del enlace ascendente de LTE. Estos métodos pueden utilizarse tanto en la fase de planificación, cuando únicamente se conocen las posiciones de los emplazamientos, como en la fase de explotación, cuando pueden mejorarse los planes de parámetros iniciales al disponer de medidas de carga de las celdas. En el Capítulo 3 se proponen métodos para mejorar las estimas de capacidad utilizadas en el proceso de dimensionado haciendo uso de medidas obtenidas en la fase de operación.

## Capítulo 2

# Planificación automática del control de potencia en el enlace ascendente de LTE

El control de potencia en el canal ascendente (*uplink*, UL) tiene un gran impacto en el rendimiento de las redes de comunicaciones móviles. En este capítulo, se aborda el estudio de algoritmos para la planificación automática de parámetros del esquema de control de potencia estandarizado para el canal físico compartido del UL (*Physical Uplink Shared CHannel*, PUSCH) de LTE. El capítulo se divide en cinco secciones. En primer lugar, se revisa el estado de la técnica de control de potencia para el enlace ascendente en LTE. A continuación, se establece la formulación del problema, presentando el modelo de sistema LTE considerado en este trabajo. Definido el problema, se realiza un análisis de sensibilidad preliminar, que sirve para diseñar los métodos de planificación de parámetros de control de potencia propuestos en esta Tesis. Seguidamente se presentan las pruebas realizadas para validar los algoritmos sobre un simulador de red de nivel de sistema. Finalmente, se presentan las conclusiones más relevantes de esta parte del trabajo.

### 2.1. Introducción

El control de potencia en el UL (*UpLink Power Control*, ULPC) es un mecanismo que se engloba dentro de la gestión de recursos radio. Este mecanismo tiene

un impacto directo sobre los niveles de señal recibida e interferencia, así como en el consumo de batería de los terminales de usuario [19]. Por esta razón, el ULPC es una de las funcionalidades que mayor atención recibe de los operadores.

En el caso del UL en LTE, el algoritmo de control de potencia se ejecuta por el terminal móvil, por lo que debe estandarizarse. Aun así, el comportamiento del ULPC puede modificarse ajustando sus parámetros de configuración celda a celda. Una configuración inadecuada de los parámetros del ULPC puede provocar una pérdida de eficiencia espectral y una calidad de servicio inadecuada. Por ello, la planificación de parámetros del ULPC es una de las tareas más importantes que deben realizar los operadores celulares durante el despliegue de sus redes.

En la práctica, la variabilidad de las condiciones de propagación, tráfico e interferencia impide a los operadores encontrar los valores óptimos de los parámetros de ULPC antes de la fase de operación. Por esta razón, los operadores suelen elegir en la fase de planificación valores de los parámetros de configuración conservadores, recomendados por el fabricante, que se reutilizan en todas las celdas. De esta manera, se desaprovecha la flexibilidad que aporta la definición de estos parámetros a nivel de celda para hacer frente a las diferencias de tráfico y propagación a lo largo de la red. Como consecuencia, se obtiene un rendimiento de la red por debajo del óptimo. Aunque esta configuración subóptima pueda modificarse después durante la fase de operación, la capacidad de suministrar unos valores iniciales adecuados para los parámetros de ULPC en la fase de despliegue es muy valorada por los operadores de red.

### 2.1.1. Trabajo relacionado y contribución

El algoritmo de ULPC estandarizado para el canal compartido de datos ascendente en LTE es el control de potencia fraccional (*Fractional Power Control*, FPC) [13, 20]. Por este motivo, numerosos estudios han analizado el rendimiento del FPC en LTE, tanto en lazo abierto [21, 22] como en lazo cerrado [19, 23–25]. Estudios más recientes [24, 26, 27] han propuesto esquemas de control de potencia más sofisticados para LTE, que tienen en cuenta las condiciones instantáneas de interferencia y carga para mejorar la cobertura y la capacidad de la red. Desafortunadamente, estos algoritmos requieren extender la funcionalidad del UE y/o del eNB, por lo que no están disponibles en las redes actuales. En tales circunstancias, la única opción que resta es el ajuste de parámetros del ULPC.

El problema de la optimización de parámetros del ULPC forma parte del caso de uso de SON conocido como optimización de la capacidad y cobertura de la red (*Coverage and Capacity Optimization, CCO*) [28–30]. En la mayoría de sistemas de comunicaciones móviles, la cobertura y la capacidad no pueden optimizarse de forma independiente. Por norma general, el aumento de los niveles de cobertura suele producir un incremento de los niveles de interferencia que reduce la eficiencia espectral del sistema, y, con ello, la capacidad de la red. Este compromiso entre cobertura, calidad de conexión y capacidad de red es inherente a las redes celulares. Para gestionar ese compromiso, se han propuesto diversas técnicas, que van desde la modificación de los ángulos de apuntamiento de antena hasta la modificación de los parámetros de ULPC.

Encontrar la mejor configuración del ULPC para cada celda de una red durante la fase de planificación es una tarea complicada. En [31], se realiza un primer intento, llevando a cabo un análisis de sensibilidad para determinar el impacto del cambio de los parámetros del FPC en LTE con la ayuda de un simulador de nivel de sistema. El resultado del análisis es una serie de recomendaciones, que establecen la mejor configuración de parámetros para escenarios macrocelulares limitados por interferencia y escenarios macrocelulares limitados por ruido. Tanto en uno como en otro escenario, la configuración de parámetros recomendada es uniforme (es decir, todas las celdas compartirían la misma configuración del ULPC). Sin embargo, para sacar el máximo partido del ajuste de parámetros, el problema debe formularse como un problema clásico de optimización. Desde el punto de vista matemático, el problema de la optimización de parámetros del ULPC es un problema de optimización multivariable (al incluir FPC varios parámetros que pueden ajustarse celda a celda), no lineal (porque las cifras de mérito no dependen linealmente de los parámetros), no separable (porque cada parámetro o celda no se puede optimizar por separado) con restricciones (porque los valores de los parámetros están acotados) y a gran escala (porque el número de celdas en la red es muy elevado).

Siguiendo esta aproximación, en [32] se formula el ajuste de parámetros de ULPC en una única celda como un problema clásico de optimización, donde la función objetivo que se optimiza incluye la tasa de transmisión de datos media de celda y la de borde de celda como principales cifras de mérito. Este análisis se extiende a un escenario multicelda en [33] formulando el problema del ajuste de parámetros de ULPC como un modelo de juegos no-cooperativo. Para resolverlo,

se propone un algoritmo de optimización iterativo heurístico, donde las celdas reportan la configuración de sus parámetros de ULPC al sistema de gestión de red, intercambiando al mismo tiempo con sus celdas vecinas información de los niveles de potencia transmitida e interferencia recibida. En [34], se propone un método de planificación automática para seleccionar la mejor configuración de los parámetros del FPC para cada celda de un escenario irregular en LTE. El método de resolución realiza una búsqueda exhaustiva implícita con el método de Taguchi sobre un simulador de nivel de sistema. Para simplificar el problema, se optimiza sólo un parámetro a la vez, pero de forma conjunta en todas las celdas. Así, se formula el problema de optimización de forma que se maximice un indicador de rendimiento de cada celda en función del valor del parámetro ajustado. En [35], se presenta un método de planificación más eficiente en términos de computación, que sustituye el simulador por un modelo analítico de rendimiento de red. El método predice la influencia de los parámetros del FPC sobre la probabilidad de aceptación de llamadas, dada una distribución espacial de tráfico concreta. Con este modelo, se calcula un valor subóptimo de estos parámetros del FPC para cada celda con un algoritmo voraz de refinamiento local aleatorio. Por desgracia, estos algoritmos no son fácilmente escalables y, lo que es peor, requieren de un modelo de sistema, analítico o de simulación, que permita evaluar la red completa en cada iteración. Esta restricción dificulta su inclusión en las herramientas comerciales de planificación de red.

Como alternativa a los métodos de planificación, otros estudios consideran el ajuste de parámetros de ULPC durante la fase de operación. En esta línea, se propone un algoritmo de ajuste automático en [36] para configurar el parámetro de potencia nominal basándose en el indicador de sobrecarga [37]. De esta manera, se pretende controlar la interferencia global en la red. De forma similar, en [38] se propone un algoritmo de optimización automática para FPC basado en un controlador difuso adaptado con técnicas de aprendizaje por refuerzo. Estos algoritmos de autoajuste, concebidos para la fase de operación, también se pueden aplicar en la planificación de red, siempre y cuando se disponga de un modelo que permita evaluar el rendimiento del sistema (por ejemplo, un simulador de red). No obstante, la mayoría de los algoritmos de autoajuste se basan en iteraciones que requieren evaluar el rendimiento del sistema para muchas configuraciones diferentes de parámetros. Este proceso iterativo es directo en redes reales debido a la disponibilidad de medidas de rendimiento de red. Sin embargo, este no es el caso de la planificación de red, donde los cálculos requeridos para medir la calidad



del plan de parámetros construido en cada iteración pueden poner en peligro la escalabilidad del método cuando se consideran escenarios grandes (por ejemplo, de cientos o miles de celdas). Por este motivo, la mayoría de métodos de planificación de ULPC de la literatura se basan en modelos analíticos simples de sistema para la evaluación del rendimiento de red. Hasta donde se conoce, muy pocos métodos son capaces de manejar escenarios irregulares con un bajo coste computacional y ninguno de ellos considera el rendimiento del control de potencia en lazo cerrado.

En este trabajo, se proponen dos algoritmos heurísticos para la planificación automática de parámetros de ULPC en el PUSCH de LTE. El primer algoritmo determina la máxima carga de celda,  $U_{UL}$ , y el valor óptimo de la potencia nominal,  $P_0$ , asumiendo compensación total de pérdidas de propagación. El segundo algoritmo determina los valores óptimos del factor de compensación de pérdidas de propagación,  $\alpha$ , y, la potencia nominal,  $P_0$ , dada una distribución de carga en la red.

Para manejar las irregularidades de la red, el problema del ajuste de parámetros se resuelve celda por celda agregando los resultados de múltiples escenarios regularizados construidos por adyacentes. Tal enfoque de regularización reduce el tamaño del espacio de soluciones, de forma que se reduce igualmente la complejidad computacional del método. En la formulación del problema se considera tanto el rendimiento del control de potencia en lazo abierto como en lazo cerrado.

De forma similar a [35], los algoritmos propuestos pueden manejar escenarios irregulares manteniendo un enfoque semianalítico. En el primer algoritmo, a diferencia del de [35], los parámetros optimizados son la potencia nominal y la máxima carga de celda, en lugar del factor de compensación de pérdidas de propagación. Por su parte, el segundo algoritmo comparte los parámetros optimizados con [35]. Sin embargo, el método propuesto aquí es completamente escalable y presenta una mayor eficiencia computacional debido al enfoque de regularización de escenarios.

## 2.2. Formulación del problema

En esta sección se realiza una descripción más detallada del problema del ajuste de parámetros del FPC. Primero se introducen los parámetros del FPC, estudiando de forma cualitativa el impacto de los mismos en el rendimiento de la red. Después

se presenta el modelo analítico de sistema desarrollado en esta Tesis, describiendo las ecuaciones matemáticas que definen su comportamiento.

### 2.2.1. Problema del ajuste de parámetros del control de potencia

El algoritmo de ULPC fija la potencia de transmisión del terminal móvil mediante la ecuación

$$P_{tx} = \min \left\{ P_{tx_{\max}}, \underbrace{P_0 + \alpha \cdot PL}_{\text{operación en lazo abierto}} + \underbrace{\Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})}_{\text{término dinámico}} + \underbrace{10 \cdot \log_{10} M}_{\text{factor de ancho de banda}} \right\}, \quad (2.1)$$

donde  $P_{tx_{\max}}$  es la máxima potencia de transmisión del UE,  $\alpha$  es el factor de compensación de pérdidas de propagación,  $PL$  son las pérdidas por propagación incluyendo la ganancia de las antenas y la pérdida de trayecto,  $M$  es el número de bloques de recursos físicos (*Physical Resource Block*, PRB) asignados al UE por el eNB, y  $\Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})$  es un término dinámico que depende del esquema de modulación seleccionado y de los comandos de transmisión de control de potencia (*Transmit Power Control*, TPC) enviados por el eNB. Todos los términos de la ecuación están expresados en unidades logarítmicas.

En la ecuación (2.1) se distinguen dos términos. El término de la derecha consiste en la suma de tres componentes: a) el nivel de potencia recibida por PRB establecido como objetivo en lazo abierto, calculado como la suma de un nivel semiestático determinado por el parámetro de potencia nominal,  $P_0$ , y un término de compensación de las pérdidas de propagación controlado por el parámetro que fija el factor de compensación,  $\alpha$ , b) un término de compensación dinámica controlado por la operación en lazo cerrado,  $\Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})$  y c) un factor de corrección por el ancho de banda utilizado,  $\log_{10} M$ . El término de la izquierda refleja el límite superior de potencia transmitida por el UE,  $P_{tx_{\max}}$ . Se dice que un UE está limitado en potencia cuando éste alcanza dicho límite superior (es decir, cuando  $P_{tx} = P_{tx_{\max}}$ ). Nótese que en este trabajo se refiere como potencia nominal del ULPC,  $P_0$ , a la potencia objetivo a recibir en el eNB en UL por PRB. Según el estándar [13], este valor de potencia objetivo se compone de un valor estático

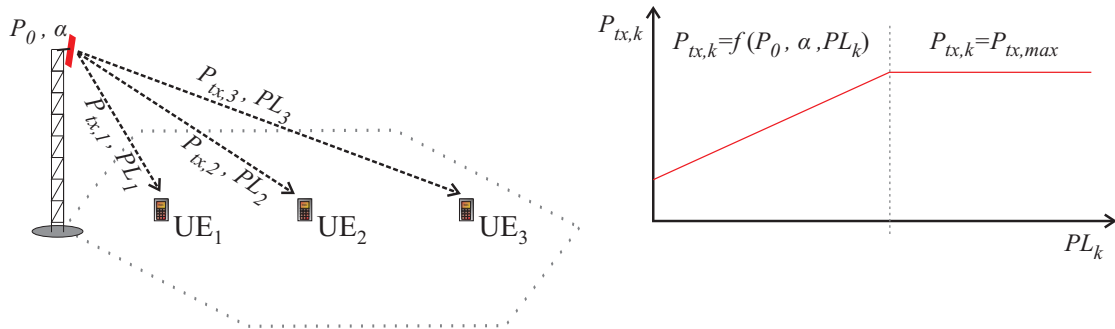


FIGURA 2.1: Control de potencia para diferentes terminales en un eNB.

configurado en el eNB y un valor específico para cada UE. En este caso, se obvia el valor específico para UE y se refiere potencia nominal al valor configurado en el eNB que comparten todos los UE.

Para entender mejor la ecuación, en la Figura 2.1 se muestra de forma gráfica el funcionamiento del algoritmo de control de potencia. De la figura se deduce que, para garantizar que la potencia recibida en el eNB sea igual a  $P_0$ , los UE más lejanos deben compensar las mayores pérdidas de propagación elevando  $P_{tx}$ . Por la misma razón, los usuarios que están cerca del eNB tienen menor probabilidad de estar limitados en potencia, considerando un mismo ancho de banda de transmisión. Según se observa en la Figura 2.1,  $P_{tx,1} \leq P_{tx,2} \leq P_{tx,3}$ , puesto que, a igualdad de  $P_0$  y  $\alpha$ ,  $P_{tx}$  sube con las pérdidas de propagación.

Del análisis anterior se concluye que el parámetro  $P_0$  controla la potencia transmitida por el UE y, por tanto, la calidad de conexión en el UL en la celda servidora. De la misma forma,  $P_0$  determina el nivel de interferencia generado hacia celdas adyacentes. Por ello, el valor de  $P_0$  en una celda de la red tiene un impacto directo tanto en el rendimiento de esa celda como en las celdas adyacentes. En la celda donde se ajusta  $P_0$ , un incremento de  $P_0$  fuerza que los usuarios en esa celda transmitan con mayor potencia. De esta manera, los usuarios que están más cerca del eNB, al no estar limitados en potencia, pueden incrementar su potencia de transmisión, y experimentarán una mejora de su relación señal a ruido e interferencia (*Signal-to-Interference Noise Ratio*, SINR). Como contrapartida, el incremento del nivel de interferencia provoca un deterioro de los niveles de SINR en las celdas adyacentes. De manera inversa, una reducción de  $P_0$  en una celda suele conllevar una mejora de la SINR en las celdas vecinas, a costa de empeorar la propia celda.

En el algoritmo de ULPC, también es posible ajustar el factor de compensación,  $\alpha$ , para controlar la interferencia entre celdas. Los valores de  $\alpha$  definidos por el estándar [13] varían entre 0 (sin compensación) y 1 (compensación completa) en toda la red. En una celda, cuanto mayor es el valor de  $\alpha$ , mayor es la potencia transmitida por sus usuarios, provocando un efecto parecido al incremento de  $P_0$ .

Un parámetro adicional a tener en cuenta durante el proceso de planificación es la ocupación máxima del UL que se permite en cada celda. En LTE, la capacidad de una celda depende de los niveles de interferencia recibidos de sus celdas adyacentes, que crecen cuanto mayor es la tasa de ocupación de PRB del sistema. Así, la carga de una celda en el UL,  $U_{UL}$ , puede limitarse de forma que se eviten problemas de interferencia en celdas adyacentes. De esta forma, puede optimizarse la calidad de conexión y la capacidad de la red durante la fase de planificación. Posteriormente, durante la fase de operación, el control de carga se lleva a cabo mediante procedimientos de gestión del tráfico, como el control de admisión de llamada o el balance de tráfico entre celdas vecinas.

En principio, los parámetros  $P_0$ ,  $\alpha$  y  $U_{UL}$  se definen a nivel de celda, de manera que cada celda podría tener sus propios valores. Para reducir el espacio de soluciones, en este trabajo se fija uno de los parámetros, quitando un grado de libertad. En un primer caso, se plantea la optimización de  $P_0$  y  $U_{UL}$  por celda, dejando  $\alpha$  fijo igual a 1 (compensación completa). Este primer caso corresponde a las primeras versiones del FPC implementadas por los fabricantes, donde  $\alpha$  es una constante de sistema, que no se puede variar. En un segundo caso, se plantea la optimización de  $P_0$  y  $\alpha$  por celda, dado un valor de  $U_{UL}$  determinado por la distribución espacial de tráfico. Este segundo caso corresponde a una situación en la que se disponen de estadísticas (o estimaciones) de ocupación de PRB de la red real.

Para el primer caso, el tamaño del espacio de soluciones es  $(N_{v_{P_0}} \cdot N_{v_{U_{UL}}})^{N_c}$ , donde  $N_{v_{P_0}}$  y  $N_{v_{U_{UL}}}$  son el número de posibles valores diferentes para  $P_0$  y  $U_{UL}$ , y  $N_c$  es el número de celdas planificadas. Para el segundo caso, el tamaño del espacio de soluciones es  $(N_{v_{P_0}} \cdot N_{v_{\alpha}})^{N_c}$ , donde  $N_{v_{\alpha}}$  es el número de valores diferentes para  $\alpha$ . En ambos casos, el gran tamaño del espacio de soluciones impide el uso de algoritmos exactos por su complejidad, siendo sustituidos por algoritmos heurísticos. Para reducir el espacio de búsqueda, algunos métodos evalúan sólo un conjunto limitado y representativo de combinaciones de parámetros, seleccionadas, por ejemplo, con el método de Taguchi [34]. Otros métodos construyen una solución

inicial asumiendo que todas las celdas tienen la misma configuración de parámetros, que después se refina progresivamente, por ejemplo, con algoritmos voraces [35]. Todos estos algoritmos requieren muchas iteraciones para obtener soluciones de una calidad razonable, ya que el cambio de cualquier parámetro en una celda afecta al rendimiento de las adyacentes, y cada iteración requiere la evaluación del rendimiento global de la red en todo el escenario después de cada ajuste de un parámetro.

En este trabajo, se sigue un enfoque distinto para reducir el espacio de soluciones. Se trata de aproximar un escenario realista, irregular y complejo por muchos escenarios regulares y simples, donde la optimización de parámetros pueda resolverse fácilmente y de forma independiente. Como se explica más adelante, el problema global de optimización multivariable se divide en múltiples subproblemas de optimización, todos sobre escenarios regulares, que requieren solo dos variables ( $P_0$  y  $U_{UL}$  en el primer caso, y  $P_0$  y  $\alpha$  en el segundo caso). Cada uno de estos subproblemas se resuelve de forma independiente, y el valor final de los parámetros por celda se obtiene agregando de forma adecuada las soluciones obtenidas en cada uno de los subproblemas.

### 2.2.2. Modelo de sistema

El UL en LTE consta de tres canales físicos: el canal físico de acceso aleatorio al medio (*Physical Random Access Channel*, PRACH), el canal físico de datos del UL (*Physical Uplink Shared CHannel*, PUSCH) y el canal físico de control del UL (*Physical Uplink Control CHannel*, PUCCH) [39]. En particular, el PUSCH se usa para enviar datos e información de control para los usuarios con una conexión activa en el UL, lo que hace que sea un elemento importante en las tareas de dimensionado y optimización. En esta sección se describe cómo se modelan en este trabajo las funcionalidades más importantes asociadas al PUSCH, como son el algoritmo de control de potencia y el esquema de asignación de recursos físicos.

#### Algoritmo de control de potencia

El objetivo del control de potencia es ajustar la potencia transmitida por el UE para garantizar los requisitos de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) en la estación base (eNB para el caso de LTE). Como ya se ha comentado, el

esquema de control de potencia del PUSCH combina un funcionamiento del algoritmo en lazo abierto con un funcionamiento en lazo cerrado. En lazo abierto, el algoritmo de control de potencia trata de compensar las variaciones lentas del canal, mientras que el algoritmo en lazo cerrado está pensado para adaptarse a cambios rápidos de las condiciones de interferencia y/o errores en la medida de las pérdidas de propagación realizadas por el terminal. En el algoritmo estandarizado [13], la potencia de transmisión del UE asignada a un usuario  $k$  viene dada por:

$$P_{TX}(k) = \min \left\{ P_{tx_{m\acute{a}x}}, \underbrace{P_0 + \alpha \cdot PL(k)}_{\text{operación en lazo abierto}} + \underbrace{\Delta_{TF}(k) + f(\Delta_{TPC}, k)}_{\text{término dinámico}} + \underbrace{10 \cdot \log_{10} M(k)}_{\text{factor de ancho de banda}} \right\}, \quad (2.2)$$

donde  $P_{tx_{m\acute{a}x}}$  es la máxima potencia de transmisión del UE,  $\alpha$  es el factor de compensación de pérdidas de propagación en el canal,  $PL(k)$  son las pérdidas de trayecto (incluyendo la ganancia de las antenas) del usuario  $k$ ,  $M(k)$  es el número de PRB asignados al UE  $k$ , y  $\Delta_{TF}(k) + f(\Delta_{TPC}, k)$  es un término dinámico que depende del esquema de modulación seleccionado y de los comandos de transmisión de control de potencia (TPC) enviados por el eNB a cada usuario  $k$ .

### Esquema de asignación de recursos

El esquema de asignación de recursos influye de manera determinante en el rendimiento del PUSCH. La asignación de PRB se realiza mediante un planificador de recursos incluido en el eNB. El planificador que se modela en este trabajo asigna PRB a usuarios de forma que se maximice la tasa de transmisión de datos media de usuario en la celda, al mismo tiempo que la tasa de datos de usuario en el borde de celda se mantiene por encima de un umbral mínimo razonable. En este proceso, se asume que:

- La reutilización del espectro de frecuencias es total, y, por tanto, todas las celdas usan la misma banda de frecuencias.
- La asignación de recursos radio se realiza de forma independiente entre celdas, de forma que los PRB se planifican sin tener en cuenta coordinación entre celdas. Esta característica, junto con la anterior, es habitual en las

redes LTE desplegadas (aunque esto irá cambiando con la evolución de los planificadores en LTE).

- La carga media de tráfico entre celdas puede variar, aunque la distribución de usuarios dentro de la celda se considera uniforme.
- Cada usuario tiene infinitos datos que transmitir, modelándose el servicio como una fuente de tráfico *full buffer*.

Con el fin de facilitar el tratamiento analítico del problema, en este trabajo se usa un algoritmo de planificación de recursos simplificado consistente en dos etapas. En una primera etapa, denominada *esquema de asignación simple*, se realiza una primera asignación preliminar de PRB basándose en el algoritmo de control de potencia en lazo abierto. De esta manera, se obtiene una estimación del número máximo de PRB asignables a cada usuario. A partir de esta estimación, se estiman la tasa de ocupación de PRB y el nivel de interferencia medio en cada eNB. Posteriormente, en un segundo esquema denominado *esquema refinado*, se tiene en cuenta el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado. Con éste segundo esquema, se realiza una nueva asignación de PRB que garantice el cumplimiento de una SINR mínima para cada usuario, usando para ello las estimaciones de interferencia que se realizan en el primer esquema. En los siguientes párrafos se describen las ecuaciones que modelan cada una de estas dos etapas.

### ***Esquema de asignación simple - Estimación de interferencia***

En una primera etapa, la asignación de PRB se basa en el algoritmo de control de potencia en lazo abierto. Para ello, se define una rejilla de posiciones que cubre el área de servicio de la celda bajo estudio. En dicha rejilla, cada posición representa un usuario potencial. El número de PRB asignados al usuario  $k$ ,  $M(k)$ , es el número máximo de PRB que pueden asignarse al UE ubicado en ese punto que permite garantizar que la potencia recibida por PRB en el eNB servidor es la potencia nominal,  $P_0$ . Dicho número máximo corresponde a la situación en la que el UE alcanza su limitación de potencia. Matemáticamente, el cálculo es:

$$M(k) = \max \left\{ M_{\min}, \min \left( 10^{(P_{tx_{\max}} - \alpha \cdot PL(k) - P_0(S(k))) / 10}, M_{\max} \right) \right\}, \quad (2.3)$$

donde  $M_{\min}$  y  $M_{\max}$  son el número mínimo y máximo de PRB que pueden asignarse a cualquier usuario, determinados por la configuración de la red,  $PL(k)$  define las



pérdidas por propagación (incluyendo la ganancia de antena y la atenuación por distancia) para el usuario  $k$ , y  $P_0(S(k))$  es el valor de  $P_0$  para la celda servidora del usuario  $k$ ,  $S(k)$ . En la ecuación,  $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$  y  $\alpha$  están expresados en unidades naturales, mientras que el resto de términos están expresados en unidades logarítmicas. En este trabajo, se considera que  $M_{\min}=2$  y que  $M_{\max}$  varía entre 6 y 100, dependiendo del ancho de banda del sistema [3].

El valor de  $M(k)$  obtenido de la aplicación de la ecuación (2.3) se usa para calcular la potencia transmitida por cada usuario,  $P_{TX}(k)$ , tal como indica la ecuación (2.2). Tras ello, se calcula el nivel de interferencia UL recibida en cada eNB  $i$ ,  $I_{UL}(i)$ , como la suma de las contribuciones de interferencia de todas las celdas adyacentes y el ruido térmico. La interferencia que produce cada celda adyacente  $j$  se calcula como el promedio de señal recibido por la celda  $i$  entre todos los usuarios interferentes en esa celda adyacente  $j$ . Dicha contribución media se pondera por la carga de la celda interferente, que viene determinada por el factor de utilización de PRB en el UL,  $U_{UL}(j)$ . Matemáticamente,

$$I_{UL}(i) = N_{TH} + \sum_{\forall j \in N(i)} \left( U_{UL}(j) \cdot \frac{1}{N_u(j)} \cdot \sum_{\forall k \in A(j)} \frac{P_{TX}(k)}{PL(k)} \right), \quad (2.4)$$

donde  $N_{TH}$  es el ruido térmico por PRB (en este trabajo,  $N_{TH} = -119.4$  dBm [3]),  $N(i)$  es el conjunto de celdas adyacentes de la celda  $i$ , el índice  $k$  hace referencia a los puntos (usuarios) de la rejilla predefinida,  $A(j)$  es el conjunto de puntos que definen el área de servicio de la celda  $j$ ,  $N_u(j)$  es el número de puntos (usuarios) en el área de servicio de la celda  $j$ , y  $P_{TX}(k)$  es la potencia de transmisión del terminal móvil del usuario  $k$ . Todos los términos de la ecuación (2.4) se expresan en unidades naturales.

### ***Esquema de asignación refinado - Estimación de SINR***

Basándose en las estimas de interferencia obtenidas con el esquema simple de asignación de PRB, un segundo esquema de asignación de PRB más preciso define el número máximo de PRB que garantiza un umbral de SINR, a diferencia del primer esquema, que trata sólo de cumplir con la potencia nominal,  $P_0$ . Este segundo esquema modela el funcionamiento en lazo cerrado. Así, el número final



de PRB asignados a un usuario se calcula con la expresión

$$M(k) = \max \left\{ M_{\min}, \min \left( 10^{(P_{tx_{\max}} - \alpha \cdot PL(k) - I_{UL}(S(k)) - SINR_{th})/10}, M_{\max} \right) \right\}, \quad (2.5)$$

donde  $I_{UL}(S(k))$  es el nivel de interferencia UL en la celda  $S(k)$  y  $SINR_{th}$  es el valor mínimo de SINR que se debe garantizar. En la ecuación,  $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$  y  $\alpha$  están expresados en unidades naturales, mientras que el resto de términos están expresados en unidades logarítmicas. En este trabajo se fija  $SINR_{th} = -2.8$  dB [3], como el valor de SINR que permite una tasa de datos equivalente en cada PRB al obtenido por una línea de conmutación de circuitos de la Red Digital de Servicios Integrados ( $\sim 64$  kbps). La ecuación (2.5) refleja cómo el número de PRB asignados a un usuario se reduce para incrementar la densidad de potencia espectral cuando la SINR mínima no se cumple, bien sea por un bajo nivel de potencia recibida o por un alto nivel de interferencia.

## Indicadores de rendimiento

Para evaluar el rendimiento de los algoritmos de planificación es necesario definir algunos indicadores de rendimiento principales, que reflejen el estado de la red. En este trabajo, se utilizan la tasa de transferencia de datos de usuario media y de borde de celda como indicadores de la capacidad (o eficiencia espectral) y la cobertura obtenida por una configuración de parámetros del ULPC.

Como paso previo, se calcula la tasa de datos máxima por PRB de cada punto del escenario (usuario) a partir de los valores de SINR con la fórmula de Shannon truncada [40]

$$TH_{perPRB}(k) = \begin{cases} 0 & SINR(k) < SINR_{min}, \\ \beta \cdot \log_2(1 + SINR(k)) & SINR_{min} \leq SINR(k) \leq SINR_{max}, \\ TH_{perPRB_{max}} & SINR_{max} < SINR(k), \end{cases} \quad (2.6)$$

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 que representa pérdidas por la no idealidad en la implementación de los equipos. A partir de este valor, el valor máximo de tasa de datos alcanzable por un usuario  $k$  se obtiene multiplicando la tasa de datos alcanzable por PRB y el número

de PRB asignados al usuario  $k$  según la ecuación (2.5). En esta Tesis, se ajustan de forma empírica los valores de la ecuación tal que  $TH_{perPRB_{max}} = 514$  kbps,  $SINR_{max} = 14$  dB,  $SINR_{min} = -9$  dB y  $\beta = 0.6$ , siguiendo las recomendaciones de un fabricante.

Una vez obtenida la tasa de datos máxima de cada punto del escenario, la tasa de datos de usuario media en la celda,  $TH_{avg}$ , se obtiene promediando las tasa de datos individuales de cada punto del área de servicio de dicha celda, como

$$TH_{avg}(i) = \frac{\sum_{\forall k \in A(i)} M(k) \cdot TH_{perPRB}(k)}{N_u(i)} \cdot U_{UL}(i) \quad , \quad (2.7)$$

donde  $U_{UL}$  es la carga máxima permitida en UL en la celda. Una localización de usuario  $k$  pertenece al área de servicio de una celda  $i$ ,  $A(i)$ , si dicha celda es la que ofrece mínimas pérdidas de propagación. En la ecuación, se observa cómo se reduce la tasa de transferencia de datos media cuando se limita la carga máxima de celda.

De la misma forma, la tasa de datos de borde de celda,  $TH_{ce}$ , se define como el percentil del 5 % de la distribución de la tasa de datos de cada punto (usuario) en la celda (es decir, el valor de tasa de datos superado por el 95 % de los puntos de la celda  $i$ ).

## 2.3. Métodos de planificación

En esta sección se describen los dos algoritmos de planificación automática de parámetros del ULPC para el PUSCH propuestos en esta Tesis. Un primer algoritmo modifica conjuntamente la potencia nominal,  $P_0$ , y la carga máxima de la celda en UL,  $U_{UL}$ , mientras que un segundo algoritmo modifica  $P_0$  y el factor de compensación por pérdidas de propagación,  $\alpha$ . En ambos algoritmos, el ajuste de parámetros se realiza celda a celda.

Para reducir la complejidad, el problema de optimización multivariable en un escenario irregular se reformula como una serie de subproblemas de optimización bivariante en un escenario regular. Para resolver los subproblemas, se realiza primero un análisis de la influencia de los parámetros optimizados en la capacidad y cobertura de una red LTE. Para ello, se lleva cabo un análisis de

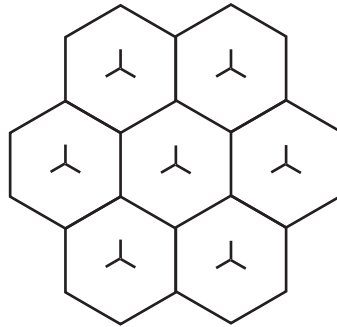


FIGURA 2.2: Escenario regular en el análisis de sensibilidad de parámetros.

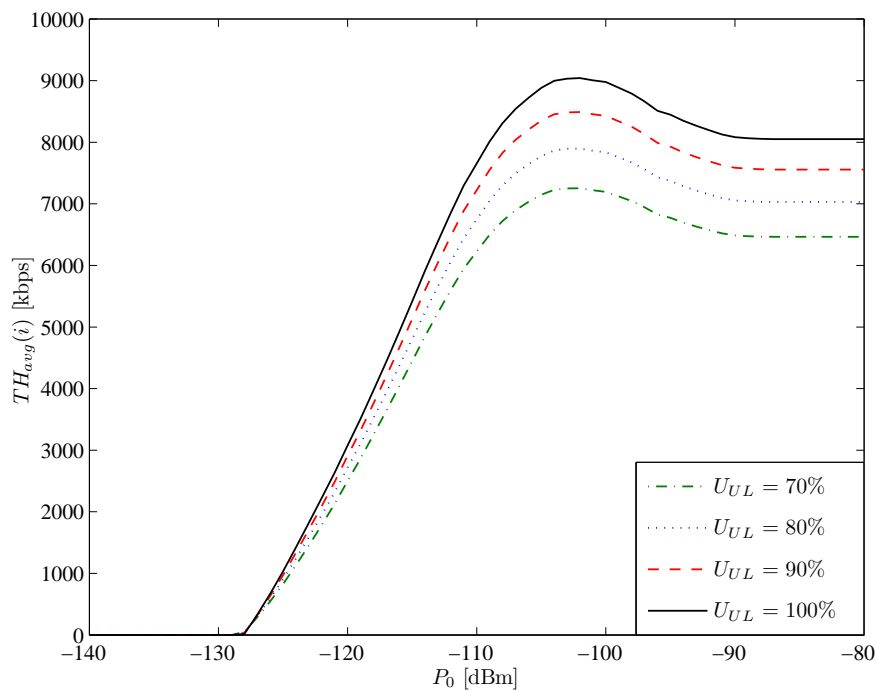
sensibilidad de los parámetros sobre un escenario regular con configuración de parámetros uniforme. Con las conclusiones de este análisis, se diseñan dos algoritmos de optimización alternativos para escenarios regulares. Posteriormente, se presenta la extensión de dichos algoritmos a escenarios irregulares, que permite obtener los mejores valores de los parámetros celda a celda.

### 2.3.1. Análisis de sensibilidad para $P_0$ y $U_{UL}$

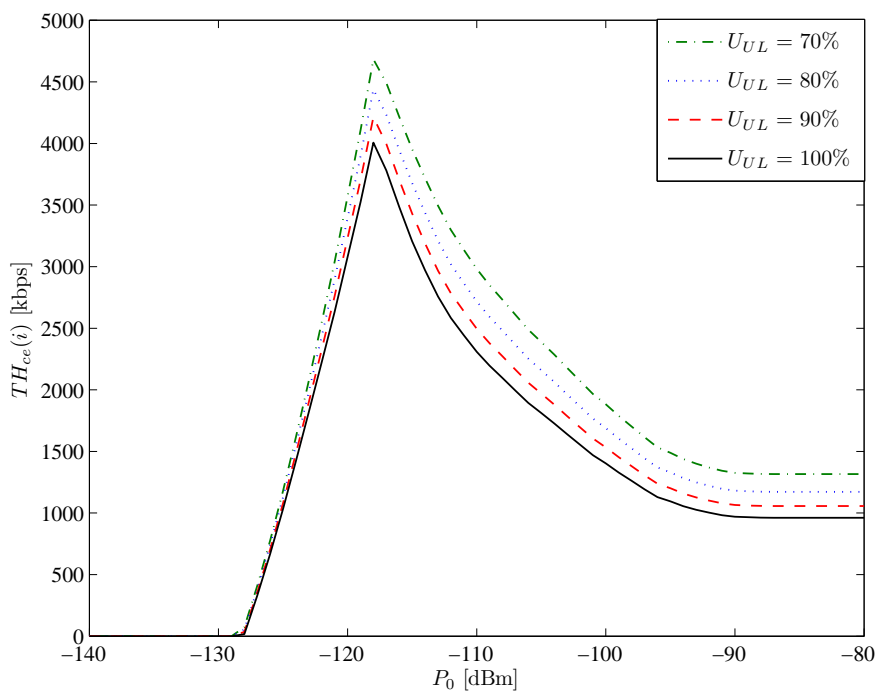
Con este análisis, se pretende cuantificar el impacto de variar  $P_0$  y  $U_{UL}$  sobre el rendimiento del UL en un escenario de red regular. Para este propósito, se utiliza un simulador estático de red LTE de nivel de sistema. El escenario de simulación, mostrado en la Figura 2.2, consiste en un emplazamiento central con tres estaciones base trisectoriales, rodeado de un primer anillo de emplazamientos vecinos. Los parámetros de simulación fundamentales se describen en la Tabla 2.1. Para evitar los efectos de borde, los indicadores de rendimiento sólo se miden en la celda central.

El rendimiento de red se evalúa para configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $U_{UL}$  en el escenario, donde todas las celdas comparten los mismos valores en estos parámetros. Las Figuras 2.3 a) y b) muestran la tasa de datos de usuario media y de borde de celda para la celda central  $i$ ,  $TH_{avg}(i)$  y  $TH_{ce}(i)$ , respectivamente, para diferentes configuraciones de  $P_0$  y  $U_{UL}$ . En el experimento, se varía el valor de  $P_0$  entre -80 dBm y -125 dBm con un valor fijo de  $U_{UL}$ . Posteriormente, se repite el barrido de valores de  $P_0$  para diferentes configuraciones de  $U_{UL}$ , desde el 70 % al 100 %. De esta forma, se obtiene una curva por cada valor de  $U_{UL}$ .

De la Figura 2.3 a) se deduce que incrementando  $P_0$  se incrementa la tasa de datos de usuario media, al aumentar la potencia transmitida por los usuarios de



(a) Tasa de datos de usuario media.



(b) Tasa de datos de usuario de borde de celda.

FIGURA 2.3: Tasa de datos en escenario regular con  $P_0$  y  $U_{UL}$  uniformes.

Parámetro	Valor
Ancho de banda del sistema	10 MHz (50 PRBs)
Frecuencia de portadora	2 GHz
Celdas	7 eNB, 21 sectores, rejilla regular (resolución 200 m).
Atenuación	$133.9+35.2\log_{10}(d)$ , $d$ en km
Constante de desvanecimiento lento	8 dB
Densidad de ruido térmico	-174 dBm/Hz
Cifra de ruido del receptor del eNB	2 dB
Radio de celda	1 km
Altura de antena en eNB	30 m
Ángulo de inclinación de antena en eNB	5°
Diagrama de captación de antena en eNB	3GPP ideal [41]
Ganancia máxima de antena en eNB	17 dB
Max. potencia de transmisión del usuario	23 dBm
Potencia nominal, $P_0$ [dBm]	[-140, -80]
Factor de compensación de pérdidas por propagación, $\alpha$	1 (compensación total)
Modelo de servicio	Full buffer
Tasa de ocupación de PRB [%]	70, 80, 90, 100

TABLA 2.1: Parámetros de simulación.

centro de celda. Esta mejora está limitada por la interferencia proveniente de otras celdas, que, en el escenario regular considerado, también crece con el incremento de  $P_0$  y  $P_{TX}$ . Como consecuencia,  $TH_{avg}(i)$  alcanza un valor máximo, tras el cual  $TH_{avg}(i)$  decrece ligeramente. El mayor valor de  $TH_{avg}(i)$  se obtiene para valores altos de  $P_0$  (en el escenario considerado, -102 dBm), donde los usuarios de centro de celda aprovechan sus bajas pérdidas de propagación a la vez que la interferencia proveniente de celdas vecinas no está muy por encima del suelo de ruido.

Sin embargo, en la Figura 2.3 b) se observa que el rendimiento de los usuarios de borde de celda se degrada rápidamente cuando se aumenta  $P_0$ . Esto se debe al hecho de que los usuarios de borde de celda están limitados en potencia, de manera que los incrementos de  $P_0$  no se traducen en incrementos de potencia transmitida en estos usuarios, mientras que la interferencia proveniente de las celdas adyacentes sí se ve incrementada (por usuarios de otras celdas que aún no están limitados en potencia). Como consecuencia,  $TH_{ce}(i)$  alcanza su valor máximo para valores moderados de  $P_0$ , cuando la interferencia recibida,  $I_{UL}(i)$ , está cercana al suelo de ruido (es decir, -119.4 dBm). Hay que resaltar que pequeñas variaciones de  $P_0$  alrededor de su valor óptimo causan amplias desviaciones en  $TH_{ce}(i)$ . Sin embargo, el valor óptimo de  $TH_{avg}(i)$  muestra una menor sensibilidad a cambios de  $P_0$ . De esta observación, se puede concluir que el compromiso entre cobertura y capacidad es más crítico para los usuarios de borde de celda.

### 2.3.2. Algoritmo 1: Optimización de $P_0$ y $U_{UL}$

Basándose en el comportamiento observado en la Figura 2.3, se diseña un algoritmo automático de planificación para  $P_0$  y  $U_{UL}$  en un escenario regular. La Figura 2.4 detalla el diagrama de flujo del algoritmo iterativo propuesto.  $P_0^{(n)}$  y  $U_{UL}^{(n)}$  indican el valor de los parámetros en la iteración  $n$ . El motor de optimización es un método simple de descenso por gradiente, cuyo objetivo es maximizar la tasa de datos de usuario media,  $TH_{avg}(i)$ , mientras se mantiene la tasa de datos de borde de celda por encima de un determinado umbral mínimo,  $TH_{ce}(i) > TH_{ce,min}$ . Esta formulación del problema CCO puede encontrarse en la literatura con anterioridad (por ejemplo, en [42]). Con este propósito,  $P_0$  y  $U_{UL}$  se configuran inicialmente con valores arbitrariamente altos (-80 dBm y 100 %, respectivamente). A partir de ese punto de comienzo, el algoritmo iterativo de descenso por gradiente disminuye (o no) estos valores de parámetros en pasos de  $\Delta P_0$  o  $\Delta U_{UL}$ .

En una primera fase, debido a los altos valores de  $P_0$ , no se cumple la restricción de cobertura (es decir,  $TH_{ce}(i) < TH_{ce,min}$ ), y, al mismo tiempo, todavía no se ha alcanzado el valor máximo de  $TH_{avg}(i)$ . El motor de optimización trata en esta primera fase de incrementar  $TH_{ce}(i)$  disminuyendo el valor de  $P_0$ . Una vez se ha conseguido cumplir con el requerimiento de cobertura (es decir,  $TH_{ce}(i) > TH_{ce,min}$ ), el motor de optimización continúa disminuyendo  $P_0$ , aunque esta vez con el objetivo de maximizar  $TH_{avg}$ . En esta segunda fase, el decremento de  $P_0$  se para cuando  $TH_{avg}(i)$  empieza a degradarse (es decir, se ha sobrepasado el valor de  $P_0$  óptimo en términos de  $TH_{avg}(i)$ ) o la tasa de datos de usuario de borde de celda se hace menor que el umbral mínimo. El parámetro  $U_{UL}$  solo se disminuye cuando no se puede cumplir la restricción de tasa de datos de borde de celda mínima. Este es el caso de los escenarios limitados por interferencia, compuestos fundamentalmente de celdas con áreas de servicio muy pequeñas. Reducir  $U_{UL}$  sólo cuando es estrictamente necesario es coherente con las políticas de los operadores, que sólo limitan la carga de una celda cuando sus vecinas experimentan condiciones de interferencia críticas.

### 2.3.3. Análisis de sensibilidad para $P_0$ y $\alpha$

A continuación se estudia el impacto de las variaciones de  $P_0$  y  $\alpha$  sobre el rendimiento de red en un escenario regular. Al igual que en el caso anterior, se usa

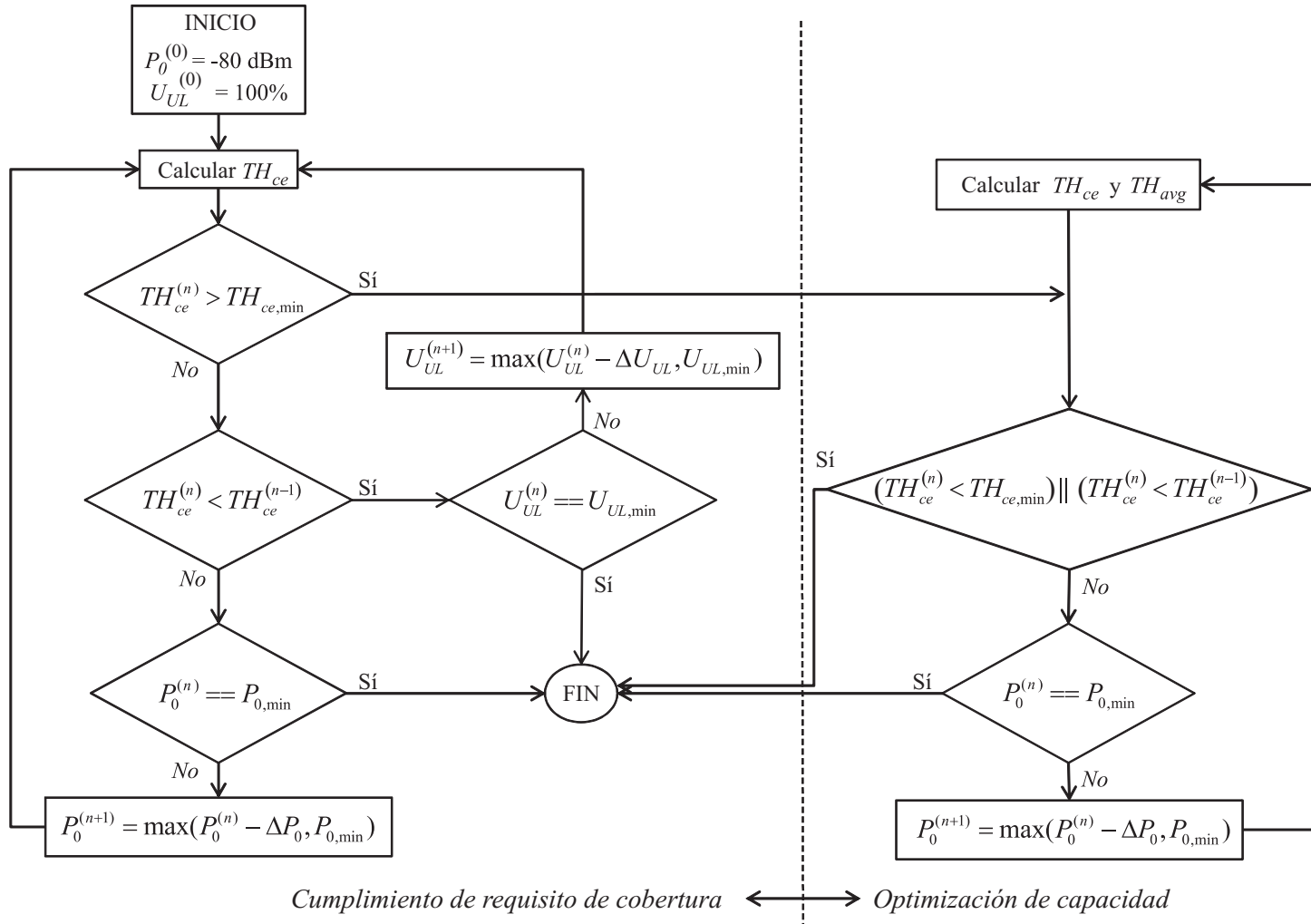


FIGURA 2.4: Diagrama de flujo del algoritmo de optimización de  $P_0$  y  $U_{UL}$ .

un simulador estático de nivel de sistema y un escenario regular idéntico al que se muestra en la Figura 2.2. Los parámetros de simulación son los mismos de la Tabla 2.1, salvo el parámetro  $\alpha$ , que se varía entre 0.4 y 1, suponiendo una carga fija del 100 % en la red. De nuevo, los indicadores de rendimiento sólo se miden en la celda central, y el rendimiento de red se analiza para configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $\alpha$  en el escenario. El experimento consiste en variar los valores de  $P_0$  en todas las celdas entre 0 dBm y -125 dBm, repitiendo para diferentes configuraciones de  $\alpha$  igual en todas las celdas, resultando una curva por cada valor de  $\alpha$ . Las Figuras 2.5 a) y b) muestran la tasa de datos media y de borde de celda para la celda central  $i$ ,  $TH_{avg}(i)$  y  $TH_{ce}(i)$ , respectivamente, para las diferentes configuraciones de  $P_0$  y  $\alpha$ .

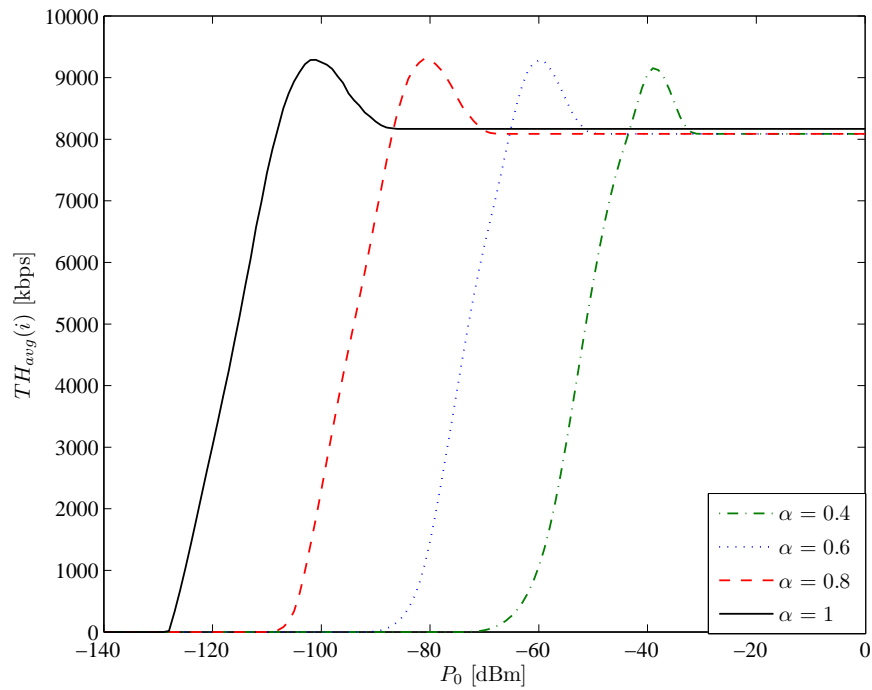
Observando las figuras, se puede afirmar que el comportamiento al variar  $P_0$  y  $\alpha$  de igual forma en todas las celdas es similar al caso anteriormente estudiado de  $P_0$  y  $U_{UL}$ . Siguen existiendo valores óptimos distintos para cada indicador, mostrando de nuevo un compromiso entre potencia transmitida e interferencia recibida, en este caso regulado por el valor de  $\alpha$  en vez de por  $U_{UL}$ . Como principal diferencia respecto al caso anterior, se observa en ambas figuras que el valor de  $P_0$  para el que se obtiene el máximo de capacidad y cobertura varía con el valor de  $\alpha$  seleccionado. En este caso, variaciones de  $\alpha$  provocan variaciones tanto en la señal recibida por el eNB como en la interferencia recibida por celdas adyacentes, pues aumenta la  $P_{TX}$  de todos los usuarios.

El valor de  $TH_{avg}(i)$  máximo no se ve afectado sensiblemente por los cambios de  $\alpha$ . Sin embargo, cuanto mayor es  $\alpha$ , mayor es el valor máximo de  $TH_{ce}(i)$  que se puede obtener. Por tanto, se puede afirmar que el rendimiento óptimo de los usuarios de borde de celda es sensible a la compensación de pérdidas de propagación, mientras que esto no ocurre para los usuarios de centro de celda. En cualquier caso, para un valor de  $P_0$  fijo, a mayor  $\alpha$  se tiene mayor interferencia (por ejemplo, para  $P_0 = -90$  dBm,  $TH_{ce}(i) = 1025$  kbps para  $\alpha=1$  y  $TH_{ce}(i) = 3430$  kbps para  $\alpha=0.8$ ).

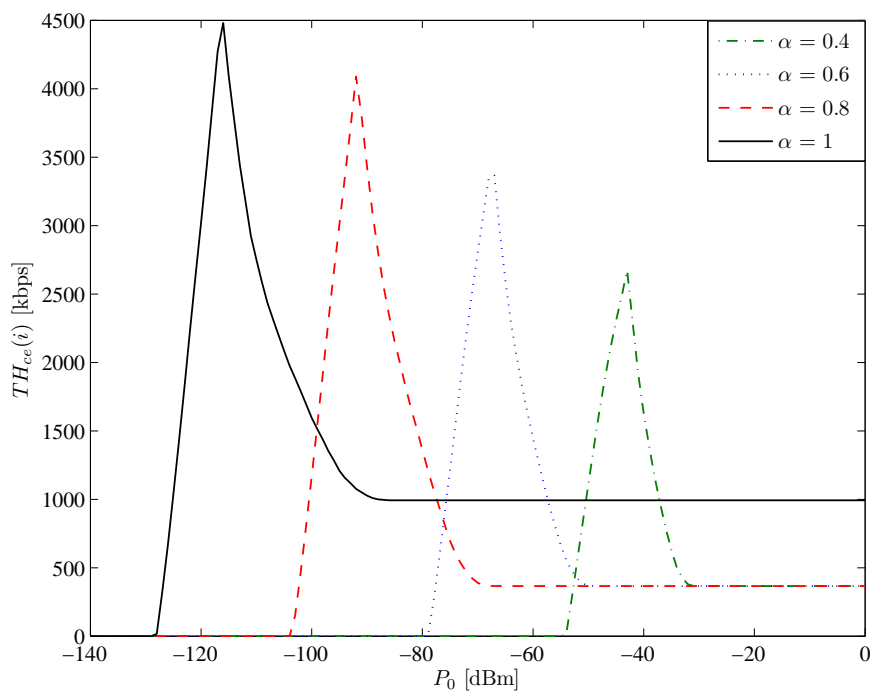
### 2.3.4. Algoritmo 2: Optimización de $P_0$ y $\alpha$

A partir del comportamiento observado en la Figura 2.5, se diseña un algoritmo de planificación automática para  $P_0$  y  $\alpha$  en un escenario regular.





(a) Tasa de datos de usuario media



(b) Tasa de datos de usuario de borde de celda.

FIGURA 2.5: Tasa de datos en escenario regular con  $P_0$  y  $\alpha$  uniformes.

En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de flujo de este segundo algoritmo.  $P_0^{(n)}$  y  $\alpha^{(n)}$  indican los valores de los parámetros en la iteración  $n$ . El algoritmo sigue la misma filosofía que el algoritmo anterior, tratando de maximizar la tasa de datos media de usuario,  $TH_{avg}(i)$ , mientras se mantiene la tasa de datos de usuario de borde de celda por encima de un determinado umbral,  $TH_{ce}(i) > TH_{ce,min}$ . Como configuración inicial, se fija  $P_0$  con un valor arbitrariamente alto (-40 dBm) y  $\alpha$  con un valor bajo descartando el cero ( $\alpha=0.4$ ). A partir de ese punto, el algoritmo iterativo de búsqueda por gradiente disminuye el valor de  $P_0$  (en pasos de  $\Delta P_0$ ) o incrementa el valor de  $\alpha$  (en pasos de  $\Delta\alpha$ ).

En una primera fase, cuando no se puede garantizar la cobertura en la celda (es decir,  $TH_{ce}(i) < TH_{ce,min}$ ) y todavía no se ha alcanzado el valor máximo de  $TH_{ce}(i)$ , el motor de optimización disminuye el valor de  $P_0$  para incrementar  $TH_{ce}(i)$ . Una vez cumplida la restricción de cobertura (es decir,  $TH_{ce}(i) > TH_{ce,min}$ ), el motor de optimización continúa disminuyendo  $P_0$ , pero esta vez con el objetivo de maximizar  $TH_{avg}$ . El decremento de esta segunda fase se para cuando  $TH_{avg}(i)$  empieza a degradarse (es decir, se ha sobrepasado el valor de  $P_0$  óptimo en términos de  $TH_{avg}(i)$ ) o la tasa de datos de usuario de borde de celda se hace menor que el umbral mínimo. El parámetro  $\alpha$  solo se incrementa cuando no se puede cumplir la restricción de tasa de datos de usuario de borde mínima aún en el caso en que se haya alcanzado el valor subóptimo de  $P_0$  en términos de  $TH_{ce}(i)$ . Éste es el caso de los escenarios limitados por ruido, formados por celdas con áreas de servicio de tamaño grande. Incrementar  $\alpha$  sólo cuando es estrictamente necesario es coherente con las estrategias de los operadores, ya que valores más pequeños de  $\alpha$  reducen el consumo de batería de los terminales móviles.

### 2.3.5. Escenario irregular

Los algoritmos de optimización descritos antes han sido diseñados a partir de un análisis de sensibilidad en un escenario regular. Por ello, ambos algoritmos sugieren el mismo valor de los parámetros para todas las celdas. Sin embargo, en una red real, las condiciones de propagación, tráfico e interferencia varían enormemente por las irregularidades del escenario. Estas irregularidades se traducen en la necesidad de una configuración de parámetros distinta en cada celda para obtener el rendimiento óptimo de la red. En esta sección se explica cómo extender los métodos de planificación ya presentados para manejar escenarios irregulares. En

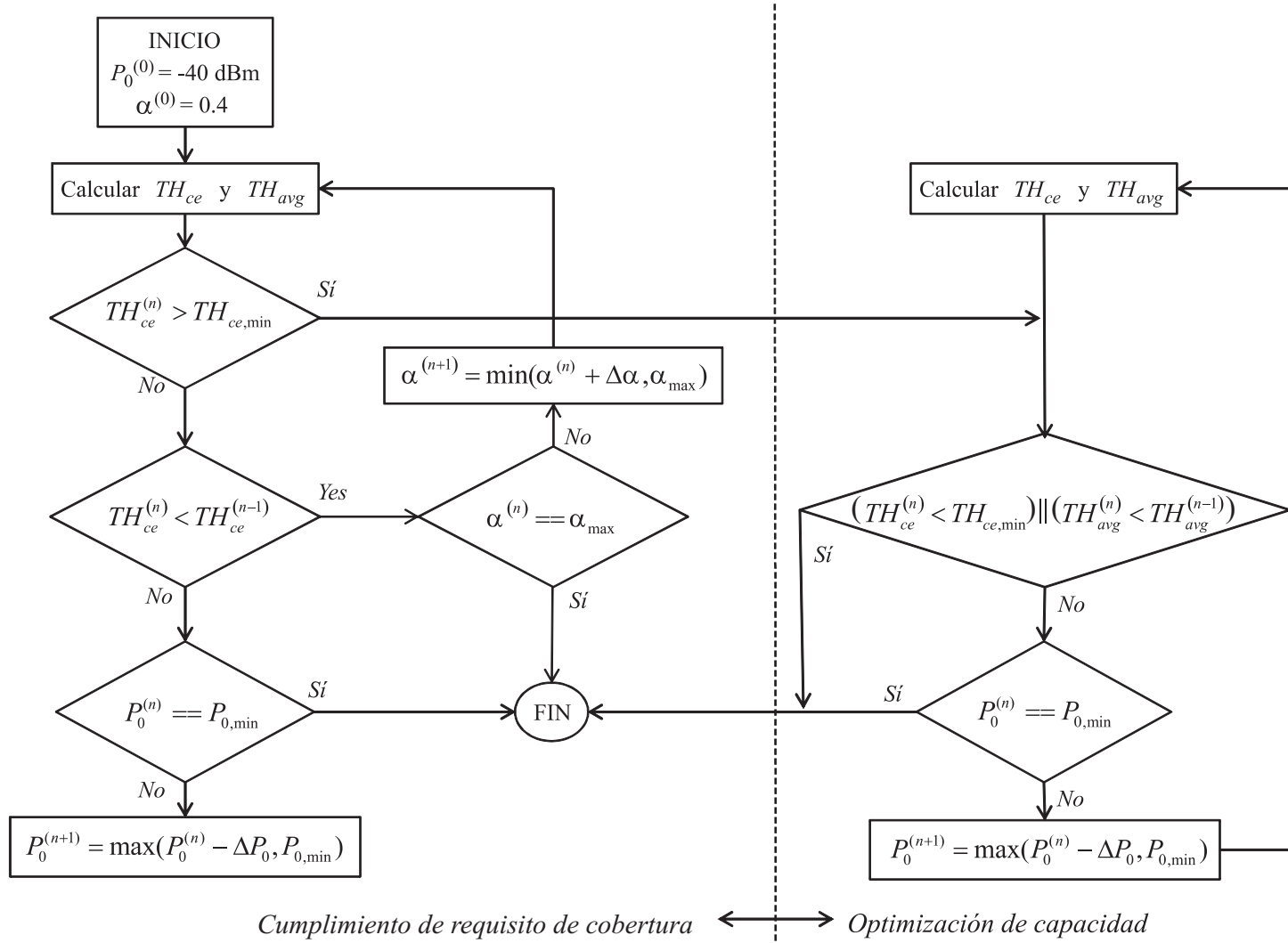


FIGURA 2.6: Diagrama de flujo del algoritmo de optimización para  $P_0$  y  $\alpha$ .

este caso, el proceso completo de planificación de parámetros consiste en cuatro etapas:

- 1) Construcción del escenario global.
- 2) División del problema global en múltiples problemas con escenarios regulares locales.
- 3) Solución local del problema.
- 4) Solución global como agregación de soluciones locales.

Los siguientes apartados describen cada una de estas etapas.

### **Construcción del escenario global - Definición de celdas adyacentes**

El punto de partida son los datos de configuración de la red que describen el escenario, como la ubicación de los emplazamientos, la altura de las antenas y los ángulos de apuntamiento (*azimuth*) y de inclinación (*tilt*) de las antenas.

El primer paso es identificar las celdas que interfieren de forma significativa en cada celda. Para ello, se construye una lista de celdas adyacentes relevantes por cada celda del escenario. En esa lista, se incluyen el resto de celdas (sectores) del mismo emplazamiento.

Existen diversas opciones para definir de forma automática una lista de celdas interferentes para una celda. La relevancia de una celda adyacente depende de la contribución que los usuarios de dicha celda tienen sobre la interferencia UL en la celda bajo estudio. A falta de medidas de propagación reales del escenario que se planifica, se requiere un simulador de nivel de sistema para averiguar primero las áreas de servicio de cada celda, y después las pérdidas de propagación entre cualesquiera dos puntos del escenario. Para reducir los cálculos, aspecto vital en una herramienta de planificación, se propone un algoritmo simple de definición de celdas adyacentes. El objetivo es ordenar las celdas adyacentes por cercanía en términos de propagación. Se asume que la pérdida de propagación promedio de todos los usuarios de la celda adyacente a la celda bajo estudio se puede aproximar por la pérdida de propagación desde la estación base bajo estudio a la estación base adyacente. Esta simplificación reduce la complejidad del cálculo a costa de

reducir también la precisión. Posteriormente, el número de adyacentes relevantes por cada celda se restringe por debajo de un límite razonable (en este trabajo, 12 celdas). Como se explica más adelante, esta restricción limita el número de instancias del problema que se deben resolver.

Con estas premisas, se define un indicador intuitivo de la relevancia de una celda adyacente  $j$  en el UL de la celda  $i$ ,  $NR_{UL}(i, j)$ , como

$$NR_{UL}(i, j) = L(i, j) - A_H(i, j) - A_V(i, j), \quad (2.8)$$

donde  $L(i, j)$  son las pérdidas por propagación entre la celda bajo estudio  $i$  y el punto del escenario donde se ubica el eNB  $j$ , y  $A_H(i, j)$  y  $A_V(i, j)$  se corresponden con las ganancias horizontal y vertical de antena de la celda  $i$  hacia el punto donde está el eNB  $j$ . En la ecuación (2.8) todos los términos se expresan en unidades logarítmicas. En términos generales, los eNB  $j$  más cercanos en términos de distancia eléctrica tienden a dar valores menores de  $NR_{UL}$ . Para limitar el número de celdas adyacentes relevantes, se descartan las vecinas  $j$  para las que el indicador  $NR_{UL}$  es 10 dB mayor que el valor de  $NR_{UL}$  de la adyacente más relevante. En cualquier caso, el número de celdas adyacentes significativas no excederá las 12 celdas.

Por conveniencia, la lista de vecinas relevantes de cada celda,  $N_r(i)$ , se divide en dos subconjuntos formados por las celdas vecinas que están en el mismo emplazamiento,  $N_{rc}(i)$  ( $c$  de coubicadas), y las que están en otros emplazamientos,  $N_{rnc}(i)$  ( $nc$  de no coubicadas).

## División en escenarios regulares locales

Una vez definida la lista de adyacentes para cada celda, comienza el proceso de planificación propiamente dicho. El problema global de planificación se divide en  $N_c$  subproblemas de optimización local (tantos como celdas), que se resuelven de forma independiente. Cada subproblema se resuelve regularizando el entorno de la celda bajo estudio. La regularización del escenario tiene dos ventajas fundamentales. La primera de ellas es que el problema de optimización del ULPC en un escenario regular, donde todas las celdas son iguales, se convierte en un problema con dos variables de decisión, reduciendo así el espacio de soluciones. La segunda es que, en un escenario regular, aparecen simetrías que permiten replicar cálculos de propagación, reduciendo así la carga computacional del método de resolución.

Para dicha regularización, se proponen dos alternativas:

- Aproximación de radio medio (*Mean Radius Approximation*, MRA): En esta aproximación, se construye un único escenario regular como el de la Figura 2.2 para cada celda bajo estudio  $i$ . La distancia entre emplazamientos para el escenario regular se toma a partir del escenario global, promediando las distancias entre el emplazamiento de la celda  $i$  bajo estudio y los emplazamientos de sus celdas adyacentes en el escenario real, excluyendo las adyacentes en el mismo emplazamiento que  $i$ . De este modo, en MRA se asume un único escenario regular por celda, a modo de escenario promedio entre todas sus adyacentes. Los valores óptimos de los parámetros  $P_0(i)$  y  $U_{UL}(i)$  (o  $\alpha(i)$ ) para la celda  $i$  se obtienen aplicando el método de optimización descrito en la Figura 2.4 (o Figura 2.6) a este escenario regular equivalente.
- Aproximación por adyacencias (*Adjacency-based Approximation*, AA): El problema de optimización de los parámetros de ULPC se divide en  $N_{neigh}(i)$  iteraciones, donde  $N_{neigh}(i)$  es el número de adyacentes relevantes que no comparten emplazamiento con la celda  $i$  (es decir, el número de elementos de  $N_{rnc}(i)$ ). Para cada adyacencia relevante  $(i, j)$ , se construye un escenario regular donde  $i$  es la celda bajo estudio y  $j$  es la celda adyacente seleccionada. El escenario regular construido guarda la geometría relativa entre las celdas  $i$  y  $j$ , manteniendo tanto la distancia entre emplazamientos como el ángulo relativo de las antenas, tal como se muestra en la Figura 2.7. Como resultado de la división del problema, se tienen  $N_{neigh}(i)$  escenarios regulares para cada celda bajo estudio  $i$ .

En ambas aproximaciones, cada escenario regular sólo requiere resolver un problema de optimización bivariable. Sin embargo, en el caso de AA, se resuelven  $N_{neigh}(i)$  instancias del problema (una por cada celda adyacente), obteniendo  $N_{neigh}(i)$  pares de valores  $(P_0(i, j), U_{UL}(i, j))$  ó  $(P_0(i, j), \alpha(i, j))$  para cada celda  $i$ . En este caso, es necesario agregar estos valores para obtener una única pareja de valores óptimos  $(P_0(i), U_{UL}(i))$  ó  $(P_0(i), \alpha(i))$ , a partir de las  $N_{neigh}(i)$  soluciones de los escenarios regulares.

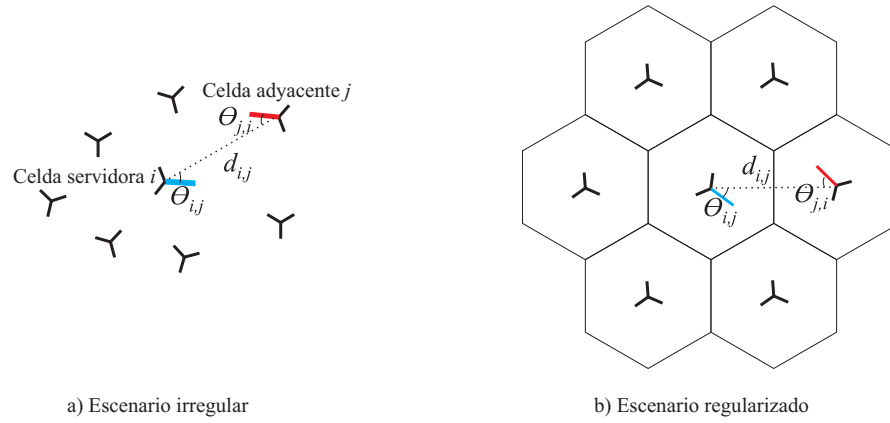


FIGURA 2.7: Regularización del escenario basada en adyacentes.

### Agregación de soluciones locales en AA

Para obtener una única solución de parámetros de ULPC en AA, se definen cuatro criterios de agregación denominados máximo, medio, mínimo y mixto, definidos como sigue:

- Método máximo (*Maximum method*, MaM):

$$P_0(i) = \text{máx} \{ [P_0(i, j) \ P_0(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.9)$$

$$U_{UL}(i) = \text{máx} \{ [U_{UL}(i, j) \ U_{UL}(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.10)$$

$$\alpha(i) = \text{máx} \{ [\alpha(i, j) \ \alpha(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.11)$$

- Método medio (*Mean method*, MeM):

$$P_0(i) = \text{mean} \{ [P_0(i, j) \ P_0(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.12)$$

$$U_{UL}(i) = \text{mean} \{ [U_{UL}(i, j) \ U_{UL}(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.13)$$

$$\alpha(i) = \text{mean} \{ [\alpha(i, j) \ \alpha(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.14)$$

- Método mínimo (*Minimum method*, MiM):

$$P_0(i) = \text{mín} \{ [P_0(i, j) \ P_0(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.15)$$

$$U_{UL}(i) = \text{mín} \{ [U_{UL}(i, j) \ U_{UL}(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.16)$$

$$\alpha(i) = \text{mín} \{ [\alpha(i, j) \ \alpha(l, i)] \}, \quad \forall j \in N_{rnc}(i), \ l/i \in N_{rnc}(l) \quad (2.17)$$

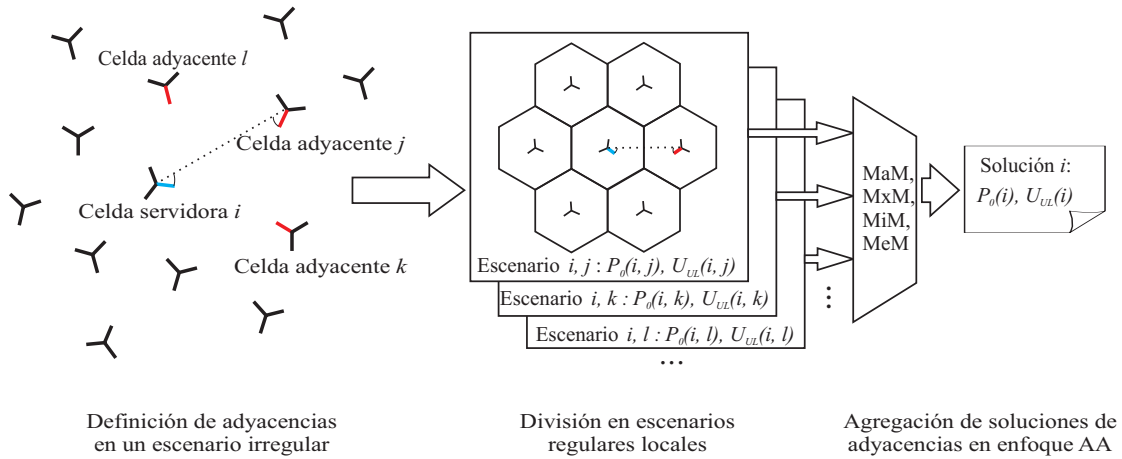


FIGURA 2.8: Planificación de un escenario irregular según método AA.

- Método mixto (*Mixed method*, MxM). Este enfoque usa el criterio máximo para  $P_0(i)$ , definido en (2.9), y el criterio mínimo para  $U_{UL}$  ó  $\alpha$ , definido en (2.16) ó (2.17).

En las ecuaciones (2.9) a (2.17),  $P_0$  se expresa en unidades logarítmicas y el resto de parámetros en unidades naturales. En esencia, en los métodos MaM y MiM se elige un valor de entre todas las soluciones obtenidas con los escenarios regulares que incluyen la celda  $i$  (bien considerada como celda bajo estudio o bien como celda adyacente). El método MeM elige el valor medio de todas las soluciones disponibles. En el caso del método MxM, el objetivo es maximizar la SINR seleccionando un valor alto de  $P_0$ , a pesar de que así se incrementa la interferencia. Para mitigar este incremento de interferencia, se selecciona el menor valor de  $U_{UL}$  ó  $\alpha$  entre los disponibles.

A modo ilustrativo, la Figura 2.8 muestra un resumen de todo el proceso de optimización para una celda  $i$  con el método AA. En ella, se distinguen los procesos de definición de adyacencias, la división en escenarios regulares locales y la agregación de soluciones.

### Complejidad computacional

La complejidad computacional del algoritmo de planificación automática propuesto con el enfoque MRA es de orden  $O(N_c)$ , ya que el número de subproblemas resueltos es exactamente el número de celdas en el escenario. Todos esos subproblemas buscan los valores óptimos de parámetros ULPC sobre un único escenario regular básico, el cual se puede resolver mediante un método de búsqueda por



gradiente en una sola variable, tal como se ha descrito en las secciones anteriores. La complejidad computacional del algoritmo propuesto con el enfoque AA es también de orden  $O(N_c)$ , ya que el número de subproblemas a resolver crece linealmente con el número total de adyacentes relevantes en el escenario, el cual es a su vez proporcional al número de celdas total del escenario una vez que se limita el número máximo de adyacentes relevantes.

## 2.4. Pruebas

En esta sección se evalúan los distintos algoritmos de planificación de parámetros de ULPC propuestos. Para ello, las soluciones construidas con cada uno de los métodos se introducen en un simulador de nivel de sistema en el que se implementa un escenario irregular real. El simulador incluye todas las funcionalidades del UL en LTE necesarias para evaluar el rendimiento del ULPC, tal como se detalla en el Apéndice A. Para mayor claridad, se describe primero la metodología experimental y después los resultados obtenidos.

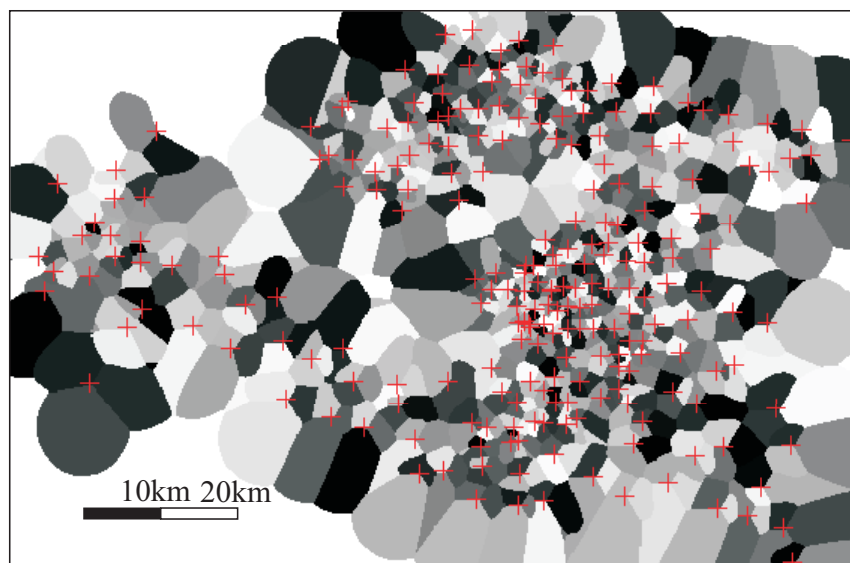
### 2.4.1. Metodología experimental

A continuación se detalla la configuración de los experimentos realizados con el simulador. Para ello, se describe el escenario y los indicadores de rendimiento empleados en la validación de cada uno de los algoritmos.

#### *Algoritmo 1 - Optimización de $P_0$ y $U_{UL}$*

Este primer algoritmo busca el valor óptimo del nivel de potencia nominal,  $P_0$ , y el nivel de carga,  $U_{UL}$ , en UL. Los resultados que obtiene, especialmente para  $U_{UL}$ , determinan la estrategia a seguir por el operador en la planificación de la carga en UL en una red LTE. Por ello, el algoritmo está concebido para la fase de dimensionamiento de la red.

El escenario considerado para este algoritmo, llamado *Escenario 1*, es un escenario real de despliegue. La Figura 2.9 muestra el escenario, que incluye 233 emplazamientos trisectoriales (699 celdas) en una extensa área metropolitana de

FIGURA 2.9: *Escenario 1.*

4350 km<sup>2</sup>. La localización de los emplazamientos, así como los ángulos de apuntamiento horizontal (*azimuth*) y vertical (*tilt*) de las antenas, se ha tomado directamente de los datos de configuración de una red real LTE. Las distancias entre emplazamientos varían entre 0.3 y 6 km. El resto de parámetros de simulación coincide con los mostrados en la Tabla 2.1.

Se evalúan cinco variantes del *Algoritmo 1*. La primera variante usa el método MRA para la regularización de escenarios, mientras que las otras cuatro usan el enfoque AA para manejar escenarios irregulares, que utilizan los criterios de agregación de soluciones MaM, MeM, MiM y MxM, respectivamente. Como referencia de comparación, se toma la mejor combinación de parámetros uniforme  $P_0$  y  $U_{UL}$ , donde  $P_0(i) = P_0(j)$  y  $U_{UL}(i) = U_{UL}(j) \forall i, j$ . Para ello, se realiza un barrido de todas las combinaciones de  $P_0$  y  $U_{UL}$ , que permite identificar la mejor combinación uniforme de estos parámetros. Dicha solución representa una cota superior del rendimiento obtenido con la estrategia clásica de despliegue del operador, que, por simplicidad, establece una configuración uniforme en toda la red. Comparando esta solución con las obtenidas por el algoritmo propuesto, se puede cuantificar el beneficio de configurar los parámetros de ULPC celda a celda. En todos los métodos,  $\alpha = 1$ .

Para evaluar la bondad de las soluciones construidas, se utilizan varios indicadores de rendimiento:

- a) Como medida de la capacidad de la red, se usa la tasa de datos de usuario media global,  $\overline{TH_{avg}(i)}$ , calculada como el promedio de  $TH_{avg}(i)$  para todas las celdas del escenario.
- b) Como medida de la cobertura de la red, se usa indistintamente la tasa de datos de usuario de borde de celda media global,  $\overline{TH_{ce}(i)}$ , calculada como el promedio de  $TH_{ce}(i)$  para todas las celdas del escenario, o el ratio de celdas que cumplen  $TH_{ce}(i) > TH_{ce,min}$ , denominado como  $R_{TH_{ce,min}}$ . En este trabajo,  $TH_{ce,min}=100$  kbps, basándose en la demanda típica de los operadores de red durante la fase de dimensionado.

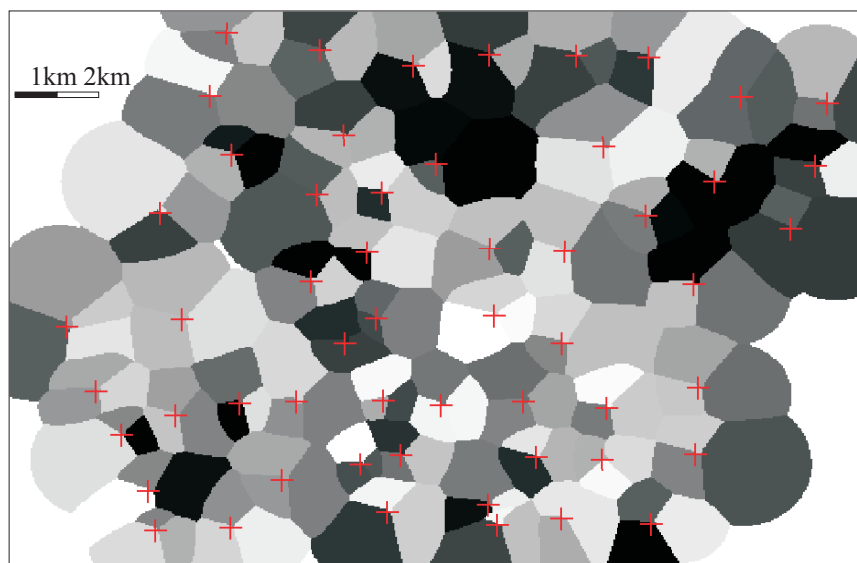
Para calcular ambos indicadores, se asume que el usuario tiene acceso al ancho de banda completo del sistema cuando lo requiere. Esta asunción, habitual en todas las herramientas de planificación, hace que las estimas de tasa de datos sean en realidad una medida de la eficiencia espectral del sistema.

### **Algoritmo 2 - Optimización de $P_0$ y $\alpha$**

El segundo algoritmo busca el valor óptimo de configuración para el nivel de potencia nominal,  $P_0$ , y el factor de compensación de pérdidas de propagación,  $\alpha$ , en UL. Ambos parámetros pueden configurarse durante la fase de explotación, por lo que este algoritmo está concebido para la fase de despliegue. En dicha fase, se puede contar con estadísticas de rendimiento de la red. De esta forma, el segundo método se plantea como un algoritmo de replanificación automática basada en medidas, que obtiene la mejor configuración de parámetros dada una distribución de carga en la red.

El escenario considerado, denominado *Escenario 2*, corresponde al de una red real ya desplegada. La Figura 2.10 muestra el escenario, que incluye 55 emplazamientos trisectoriales (165 celdas) en un área suburbana de 320 km<sup>2</sup>. La ubicación de los emplazamientos y los ángulos de azimuth e inclinación de las antenas están tomados de la red real. En este caso, la distancia entre emplazamientos varía entre 0.5 y 3.55 km. También de la red se obtiene la tasa media de ocupación de PRB en la hora cargada de cada celda,  $U_{UL}$ , que para este escenario está comprendida entre el 5% y el 17.5%. El resto de parámetros de simulación son los de la Tabla 2.1.

En este escenario se evalúan las cuatro variantes del *Algoritmo 2*, correspondientes a los cuatro criterios de agregación de soluciones MaM, MeM, MiM y MxM.

FIGURA 2.10: *Escenario 2.*

Por tanto, todas las variantes del *Algoritmo 2* usan el método AA para manejar escenarios irregulares.

Al igual que con el *Algoritmo 1* y con el mismo objetivo, también se evalúan diversas configuraciones uniformes de parámetros en toda la red. Para evaluar la bondad de las soluciones, se utilizan los mismos indicadores que en el *Escenario 1*. El umbral usado en este caso para el *Algoritmo 2* es  $TH_{ce,min}=1000$  kbps, por tratarse de un escenario con celdas más pequeñas, y, por tanto, con mejor rendimiento en el borde de celda.

## 2.4.2. Resultados

Para cada uno de los algoritmos, se analizan en primer lugar los resultados obtenidos con la configuración uniforme de parámetros para ULPC. A continuación, el análisis se centra en las soluciones propuestas por cada una de las variantes de los algoritmos de planificación automática diseñados anteriormente. Finalmente, se analiza el tiempo de ejecución para verificar la eficiencia computacional.

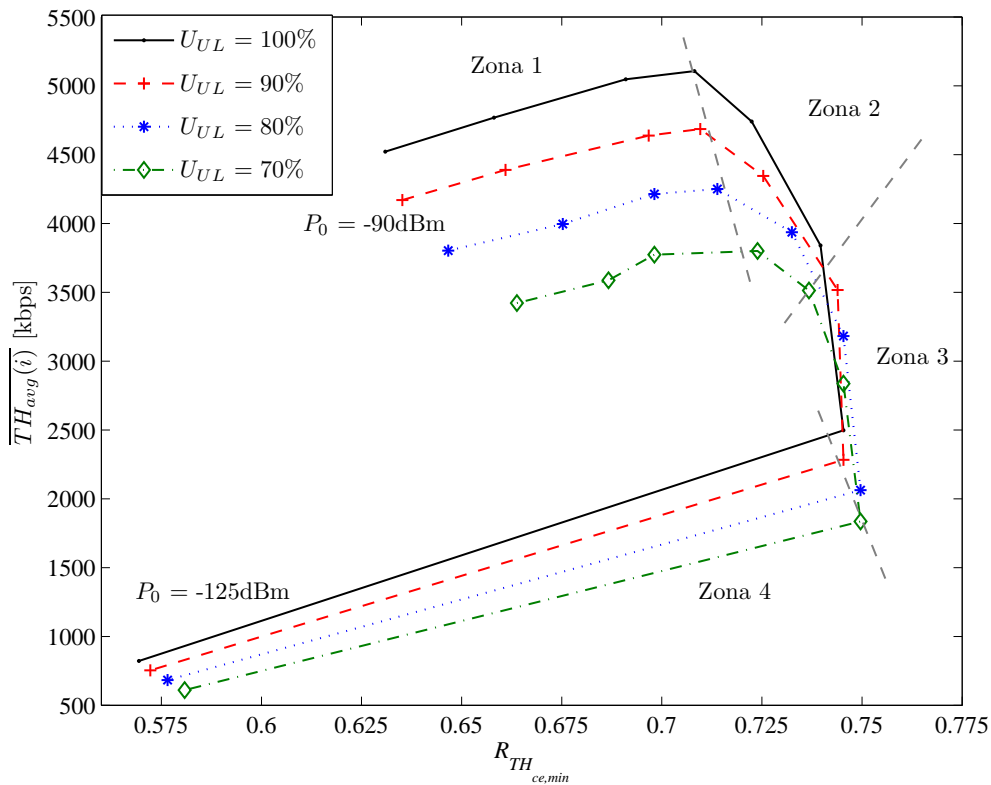


FIGURA 2.11: Rendimiento global del *Escenario 1* con configuración uniforme de parámetros  $P_0$  y  $U_{UL}$ .

### Algoritmo 1: Optimización de $P_0$ y $U_{UL}$

En primer lugar se realiza el análisis de resultados para el *Algoritmo 1*.

- Configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $U_{UL}$  en el *Escenario 1*

La Figura 2.11 muestra el rendimiento de la red del *Escenario 1* para diversas configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $U_{UL}$ . Cada punto en la figura se corresponde con un plan de configuración de parámetros de red diferente. Las distintas curvas que se observan corresponden a diferentes valores de  $U_{UL}$  (70, 80, 90 y 100%) y los puntos de cada curva corresponden a valores de  $P_0$  que varían desde -125 dBm (abajo y a la izquierda en la figura) hasta -90 dBm (arriba y a la izquierda). Cabe destacar que, según los indicadores representados en la figura, los puntos que se encuentran en el área superior derecha de la misma se corresponden con un mejor rendimiento de red (esto es, mayor cobertura y mayor capacidad).

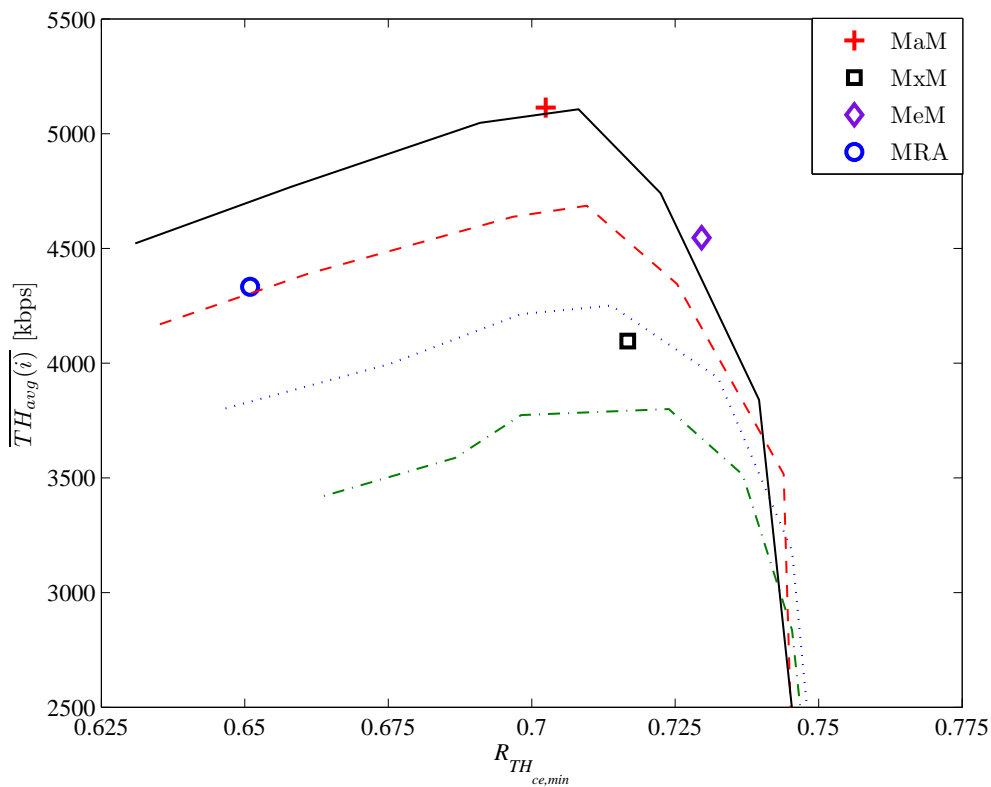
En cada curva es posible identificar cuatro zonas, denominadas Zona 1 ( $P_0 \geq -105$  dBm), Zona 2 ( $P_0 \in (-105, -115]$  dBm), Zona 3 ( $P_0 \in (-115, -119]$  dBm) y Zona 4 ( $P_0 < -119$  dBm).

Con valores altos de  $P_0$  (Zona 1), ambos indicadores de capacidad y cobertura mejoran conforme  $P_0$  va decreciendo. En esta zona, los niveles de interferencia se encuentran bastante por encima del suelo de ruido, por lo que disminuir  $P_0$  en una celda y sus vecinas hace que decrezca proporcionalmente la interferencia en dichas celdas. Como consecuencia, la tasa de datos de usuario de borde de celda mejora, mientras que la tasa de datos de los usuarios de centro de celda se mantiene, pues aunque el nivel de señal también decrece, no lo hace en mayor medida que la interferencia, y, como consecuencia, se mantiene una SINR de centro de celda bastante elevada. Para valores intermedios de  $P_0$  (Zona 2), existe un compromiso entre capacidad y cobertura. La tasa de datos de usuario de borde celda sigue mejorando con los decrementos de  $P_0$ , pero a expensas de degradar la tasa de datos de usuario media de red. Si se continúa bajando  $P_0$  (pasando a la Zona 3), la interferencia comienza a ser comparable al suelo de ruido o incluso despreciable frente al mismo, por lo que no hay mayor beneficio en seguir bajando la interferencia. Al contrario, los usuarios de borde de celda también experimentan una degradación en su tasa de datos. Finalmente, se produce un acusado empeoramiento del rendimiento de red cuando  $P_0$  está por debajo del suelo de ruido, que se sitúa en -119.4 dBm en este trabajo (Zona 4).

La influencia de las variaciones en  $U_{UL}$  puede verse al comparar las diferentes curvas de la Figura 2.11. Se puede observar que las curvas se desplazan hacia arriba (mejor capacidad) y a la izquierda (peor cobertura) cuando se incrementa  $U_{UL}$ . La causa es que, cuando hay más recursos radio disponibles en el UL, los usuarios pueden alcanzar mayor tasa de datos (es decir, se incrementa  $\overline{TH_{avg}(i)}$ ), pero los valores de interferencia también se incrementan, y, por tanto,  $R_{TH_{ce,min}}$  decrece.

- Planes de parámetros no uniformes de  $P_0$  y  $U_{UL}$  - *Algoritmo 1*

La Figura 2.12 muestra el rendimiento de la red LTE del *Escenario 1* para las diferentes propuestas de planes de parámetros  $P_0$  y  $U_{UL}$  obtenidos con el *Algoritmo 1*. Para poder establecer una comparación, se superponen las curvas resultado de las configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $U_{UL}$ . Nótese que un punto (solución) en la figura implica un valor distinto de  $P_0$  y  $U_{UL}$  para cada celda en la red. Los ejes en la figura se han ajustado para una mejor visualización de los resultados. Es por este


 FIGURA 2.12: Rendimiento global de la red con el *Algoritmo 1*.

ajuste por lo que la solución MiM no aparece en la figura,  $\overline{TH_{avg}(i)} = 1254$  kbps y  $R_{TH_{ce,min}} = 205/699 = 0.29$ ). La solución MiM configura  $P_0(i)$  a valores demasiado bajos. La supuesta ventaja del decremento de interferencia se ve superada por la degradación del enlace experimentado incluso por los usuarios que están en las mejores condiciones (cerca del eNB). Las demás soluciones propuestas (MaM, MeM, MxM y MRA) obtienen un rendimiento similar a la mejor configuración uniforme de parámetros (es decir, la parte superior derecha de la figura).

Para concluir el análisis del *Algoritmo 1* se realiza una inspección más detallada de las soluciones propuestas por cada método de agregación. Así, en la Figura 2.13 se muestra una comparación de las diferentes funciones de distribución de las soluciones propuestas por cada método para los valores de  $P_0$  (Figura 2.13 a)) y  $U_{UL}$  (Figura 2.13 b)).

En la Figura 2.13 a) se observa cómo la solución de MaM tiene los valores de  $P_0$  más elevados, mientras que MiM tiene los más bajos. La solución de MeM para  $P_0$  se encuentra entre MaM y MiM. Se observa que el rango de valores de  $P_0$  propuestos por cada método puede alcanzar los 30 dB, lo cual es prueba de

la irregularidad de la solución. Algo similar se puede decir para la función de distribución de los valores de  $U_{UL}$  representados en la Figura 2.13 b). En este caso el rango de soluciones abarca desde 0.7 hasta 1, es decir, existen soluciones de  $U_{UL}$  para cada celda en todo el rango dinámico permitido.

Por último, se comprueba la estructura espacial de la solución del método MeM representando con un mapa de colores los valores de  $P_0$  (Figura 2.14 a)) y  $U_{UL}$  (Figura 2.14 b)) obtenidos en cada celda. El análisis se centra en MeM por ser el método que consigue un mejor compromiso entre capacidad y cobertura. Por un lado, en la Figura 2.14 a) se observa cómo los valores de  $P_0$  son más altos en las celdas pequeñas, ya que al estar los usuarios más cerca, pueden garantizar valores más altos de potencia nominal en el eNB. Por el contrario, las celdas grandes sufren del efecto contrario y, por ello, el valor propuesto de  $P_0$  es menor. Por otro lado, en la Figura 2.14 b) se observa que se limita la carga en las celdas mayores, ya que es más probable que tengan problemas de cobertura que el algoritmo intenta mitigar bajando la interferencia. No obstante, para las celdas pequeñas, el valor de  $U_{UL}$  es más próximo a 1, ya que no es necesario bajar la interferencia para cumplir el requisito de cobertura establecido ( $TH_{ce,min}$ ).

### **Algoritmo 2: Optimización de $P_0$ y $\alpha$**

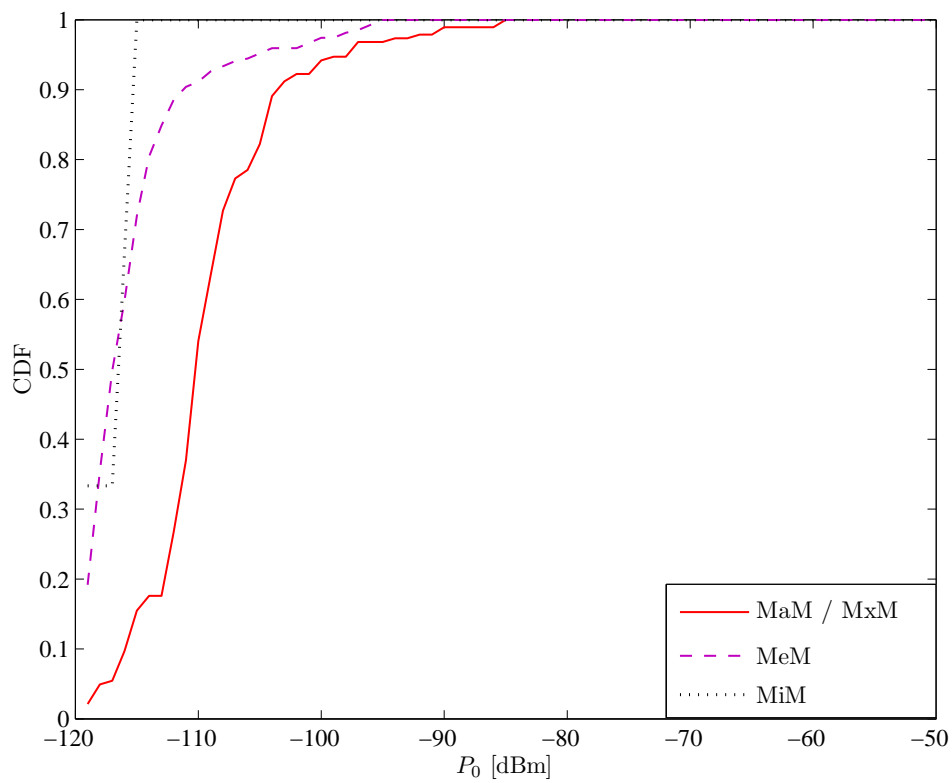
En segundo lugar, se presenta el análisis de resultados para el *Algoritmo 2*.

- Configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $\alpha$  en el *Escenario 2*

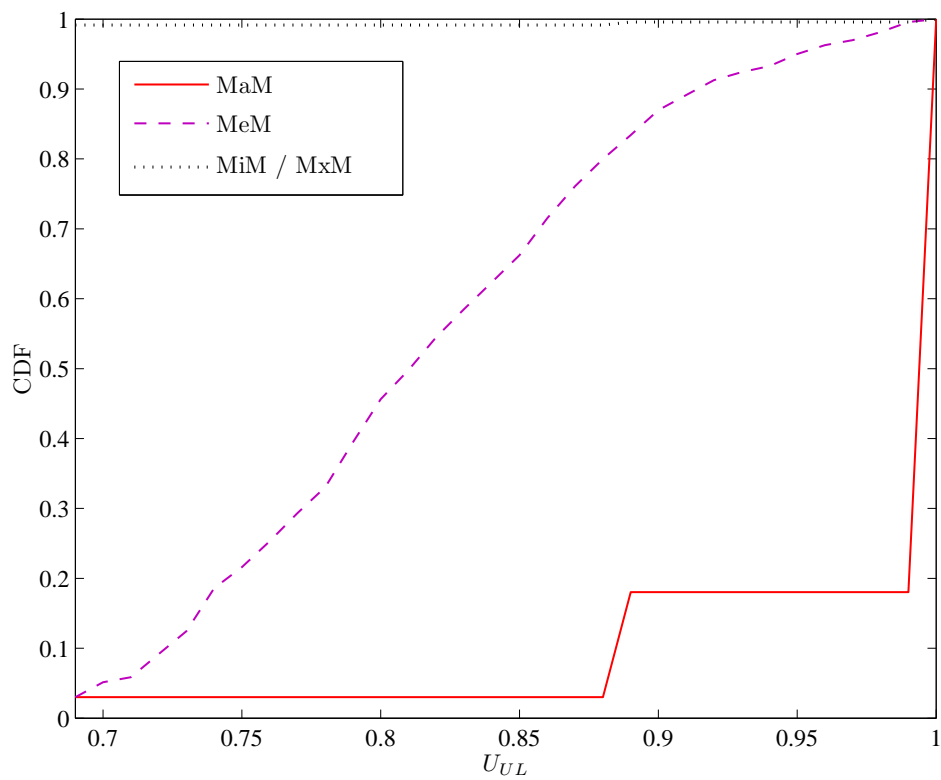
La Figura 2.15 muestra el rendimiento de la red del *Escenario 2* para configuraciones uniformes de los parámetros  $P_0$  y  $\alpha$ . Cada punto en la figura se corresponde con un plan de configuración de parámetros de red diferente. Las distintas curvas que se observan corresponden a diferentes valores de  $\alpha$ , indicados en la leyenda, mientras que los puntos de cada curva corresponden a valores de  $P_0$  que varían desde -125 dBm hasta -40 dBm. Cabe destacar que, según los indicadores representados en la figura, los puntos que se encuentran en el área superior derecha de la misma se corresponden con un mejor rendimiento de red.

El comportamiento del rendimiento de red cuando varía  $P_0$  es similar al descrito en la Sección 2.4.2. El impacto que tiene la variación de  $\alpha$  puede observarse al comparar las diferentes curvas de la Figura 2.15. En este caso, un decremento del valor de  $\alpha$  provoca un desplazamiento de las curvas hacia arriba (mejor



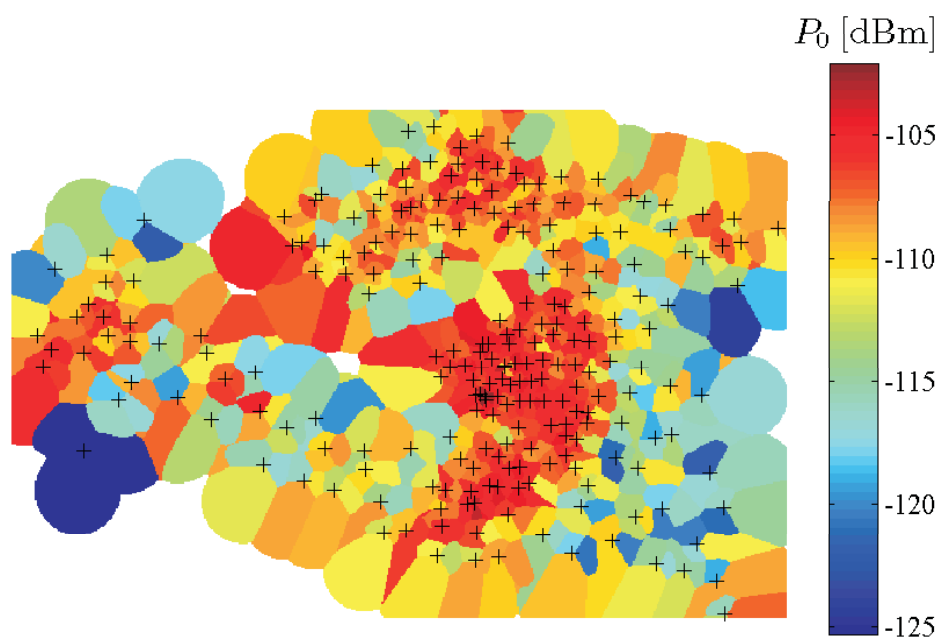


(a) Función de distribución de  $P_0$ .

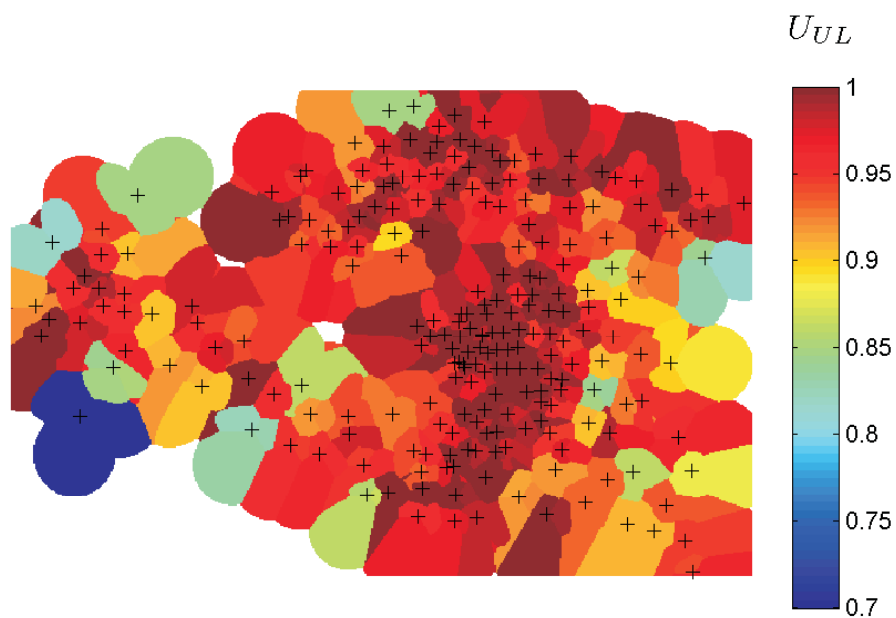


(b) Función de distribución de  $U_{UL}$ .

FIGURA 2.13: Comparación de soluciones para el *Algoritmo 1*.



(a) Valores de  $P_0$ .



(b) Valores de  $U_{UL}$ .

FIGURA 2.14: Solución MeM para el *Algoritmo 1*.

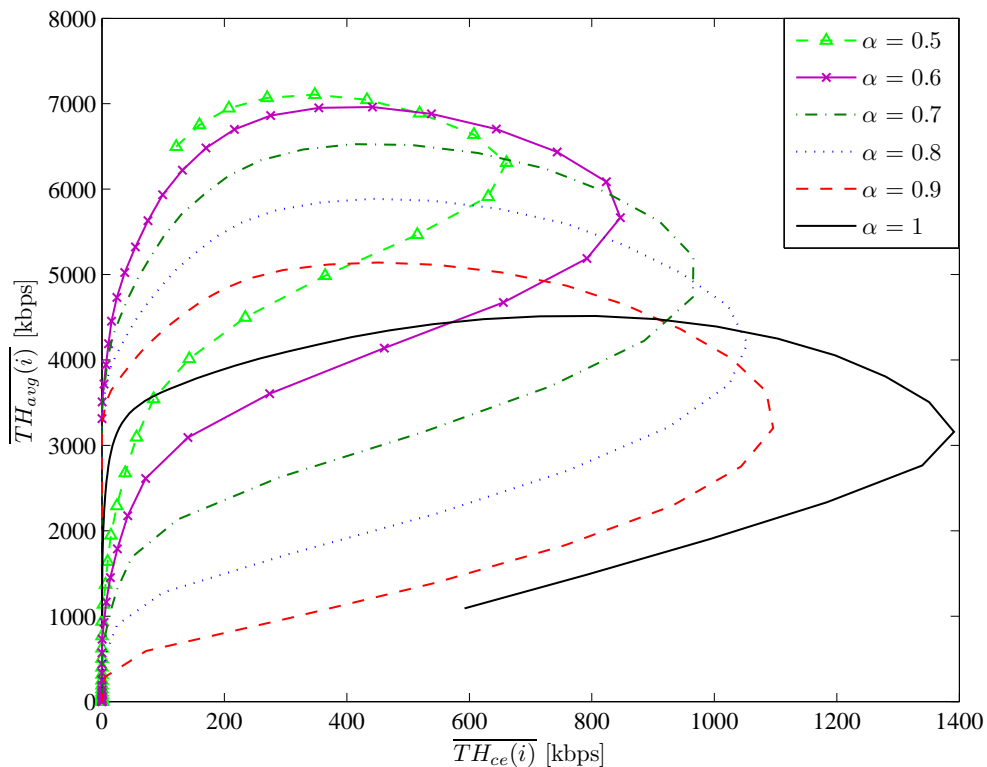


FIGURA 2.15: Rendimiento global del *Escenario 2* con configuración uniforme de los parámetros  $P_0$  y  $\alpha$ .

capacidad) y a la izquierda (peor cobertura). La causa es que una menor compensación de pérdidas de propagación reduce la interferencia, haciendo que los usuarios puedan alcanzar mayor tasa de datos (es decir, se incrementa  $\overline{TH_{avg}(i)}$ ). Como contrapartida,  $\overline{TH_{cc}(i)}$  decrece y de ahí el desplazamiento a la izquierda de las curvas. Este hecho se produce porque los usuarios de borde obtienen peor SINR al compensar en menor medida las pérdidas por propagación. Así, la interferencia disminuye menos que la señal recibida en el borde de celda.

- Planes de parámetros no uniformes de  $P_0$  y  $\alpha$  - *Algoritmo 2*

La Figura 2.16 muestra el rendimiento de la red LTE del *Escenario 2* para las diferentes soluciones de parámetros  $P_0$  y  $\alpha$  obtenidas con el *Algoritmo 2*. Con el objetivo de poder establecer una comparación, se superponen las curvas resultado de las configuraciones uniformes de  $P_0$  y  $\alpha$ . Nótese que un punto (solución) en la figura implica un valor distinto de  $P_0$  y  $\alpha$  para cada celda en la red.

En este caso, puede observarse que las soluciones MaM y MiM obtienen un peor rendimiento que el resto de métodos. En el caso de MaM existe un claro problema

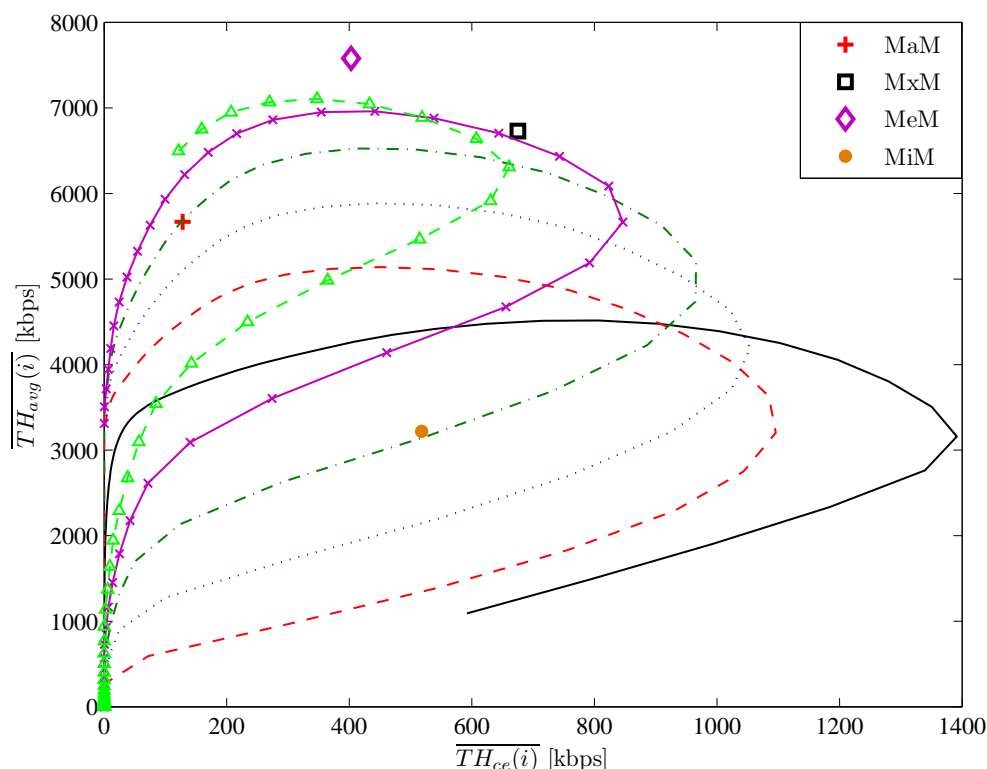


FIGURA 2.16: Rendimiento global de la red con el *Algoritmo 2*.

de cobertura, la cual disminuye en un 80.77% respecto de la máxima cobertura conseguida por MxM ( $\overline{TH_{ce}(i)}=675$  kbps), aunque el rendimiento en capacidad también se ve afectado, disminuyendo un 24.74% con respecto del conseguido por MeM ( $\overline{TH_{avg}(i)}=7580$  kbps). En el caso de la solución obtenida por MiM, la cobertura no es el problema, pues sólo empeora 23.26% con respecto a la máxima conseguida por MxM. Sin embargo, la capacidad empeora un 57.52% con respecto a la máxima conseguida por MeM. En el caso de MxM y MeM, su rendimiento supera al de las configuraciones típicas de parámetros uniformes. Así, se puede observar cómo la diferencia de capacidad entre la máxima capacidad obtenida por la solución MeM y MxM es del 11.21%. Por otra parte, la diferencia entre la máxima cobertura que obtiene MxM y la que obtiene MeM es de un 40.3%. En cualquier caso, cualquiera de las soluciones que mejoran el rendimiento de las curvas de referencia puede ser elegida, en función de las exigencias del operador (dependiendo de si se quiere favorecer la cobertura o la capacidad).

Igual que se hizo en el caso del *Algoritmo 1*, para finalizar el análisis del *Algoritmo 2* se realiza una inspección más detallada de las soluciones propuestas. Así, en la Figura 2.17 a) y b) se muestra una comparación de las diferentes funciones de

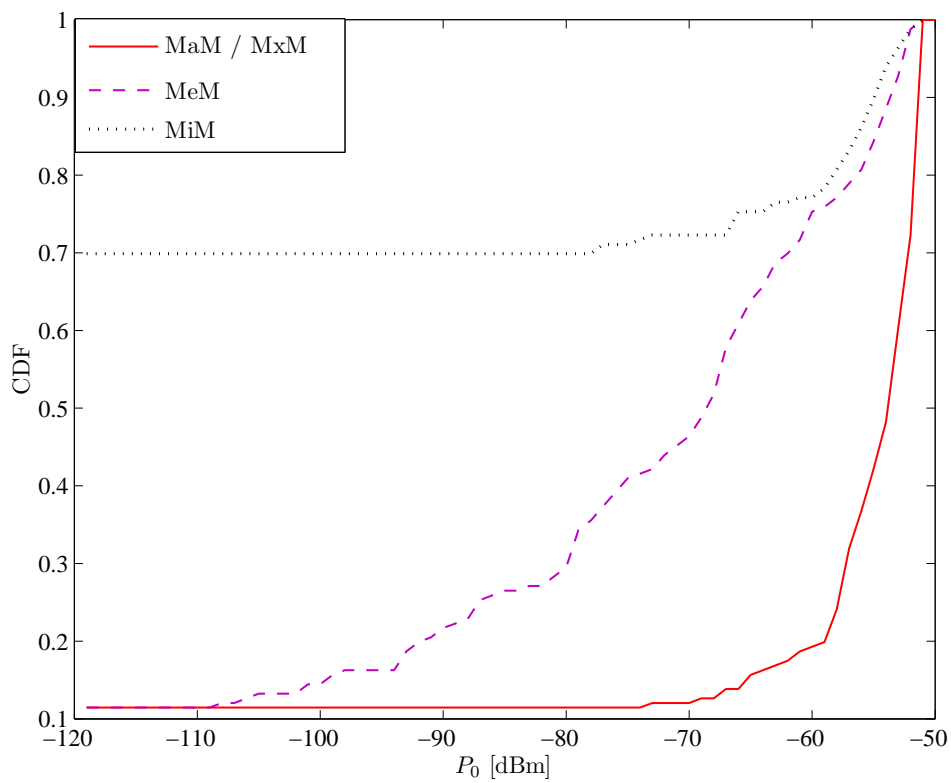
distribución de las soluciones propuestas por cada método para los valores de  $P_0$  y  $\alpha$ , respectivamente. En la Figura 2.17 a) se observa cómo de nuevo MaM propone los valores de  $P_0$  más elevados, mientras que MiM propone los más bajos. La solución de MeM para  $P_0$  se encuentra entre MaM y MiM. En este caso, el rango de valores de  $P_0$  propuestos por cada método se eleva hasta los 50 dB, lo cual prueba de la irregularidad de la solución. Algo similar aplica a la función de distribución de los valores de  $\alpha$  representados en la Figura 2.17 b). En este caso el rango de soluciones de  $\alpha$  propuestas abarca desde 0.48 hasta 0.63. Aun siendo soluciones irregulares, la topología del *Escenario 2* es significativamente más uniforme que la del *Escenario 1*.

Se concluye representado con un mapa de colores la solución de  $P_0$  y  $\alpha$  obtenida con la variante MeM del *Algoritmo 2*. Al utilizar el algoritmo estadísticas reales de carga en el UL de las celdas del escenario, también se representa el valor de  $U_{UL}$  medido para cada celda en la Figura 2.18 c). Por un lado, en la Figura 2.18 a) no se observa en este caso de forma clara que los valores de  $P_0$  sean más altos en las celdas pequeñas. Por el contrario, hay una mezcla de valores que se puede justificar por la influencia de las cargas reales, que representan un alto grado de irregularidad, como se muestra en la Figura 2.18 c). Por otro lado, en la Figura 2.18 b) se observa que el rango de variación de  $\alpha$  está bastante acotado. Este hecho se justifica por la topología del escenario, que, a diferencia del *Escenario 1*, no presenta diferencias muy grandes de tamaño entre celdas.

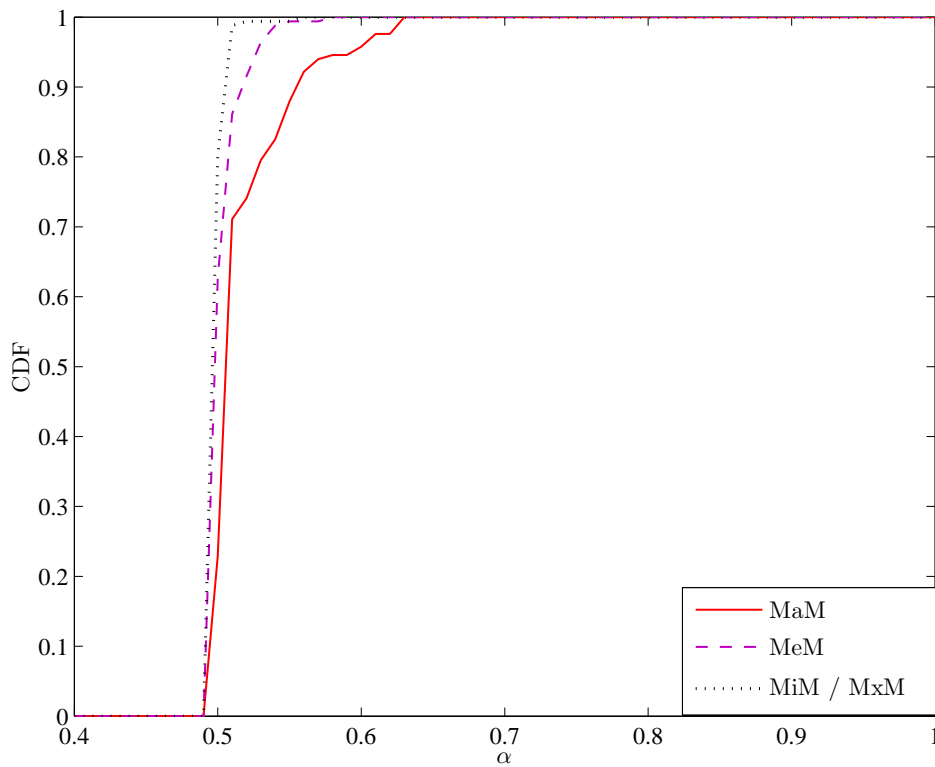
## Complejidad computacional

Para evaluar la complejidad computacional de los algoritmos propuestos se utiliza como referencia el *Escenario 1*, por ser de mayor tamaño y comprender un número de celdas representativo. De esta manera, se pondrá de manifiesto la diferencia real entre los métodos clásicos de planificación y los métodos eficientes que se han desarrollado.

Todos los métodos se ejecutan en un servidor equipado con un procesador Intel® Xeon® a 3.47 GHz de frecuencia de reloj y 12 GB de memoria RAM. Con el simulador, el tiempo requerido para construir el juego de curvas de la Figura 2.11, que cubre sólo 36 combinaciones de valores de parámetros uniformes, es superior a 2500 segundos para el *Escenario 1*. Por el contrario, cualquiera de los métodos de planificación propuestos para construir un plan subóptimo de parámetros no

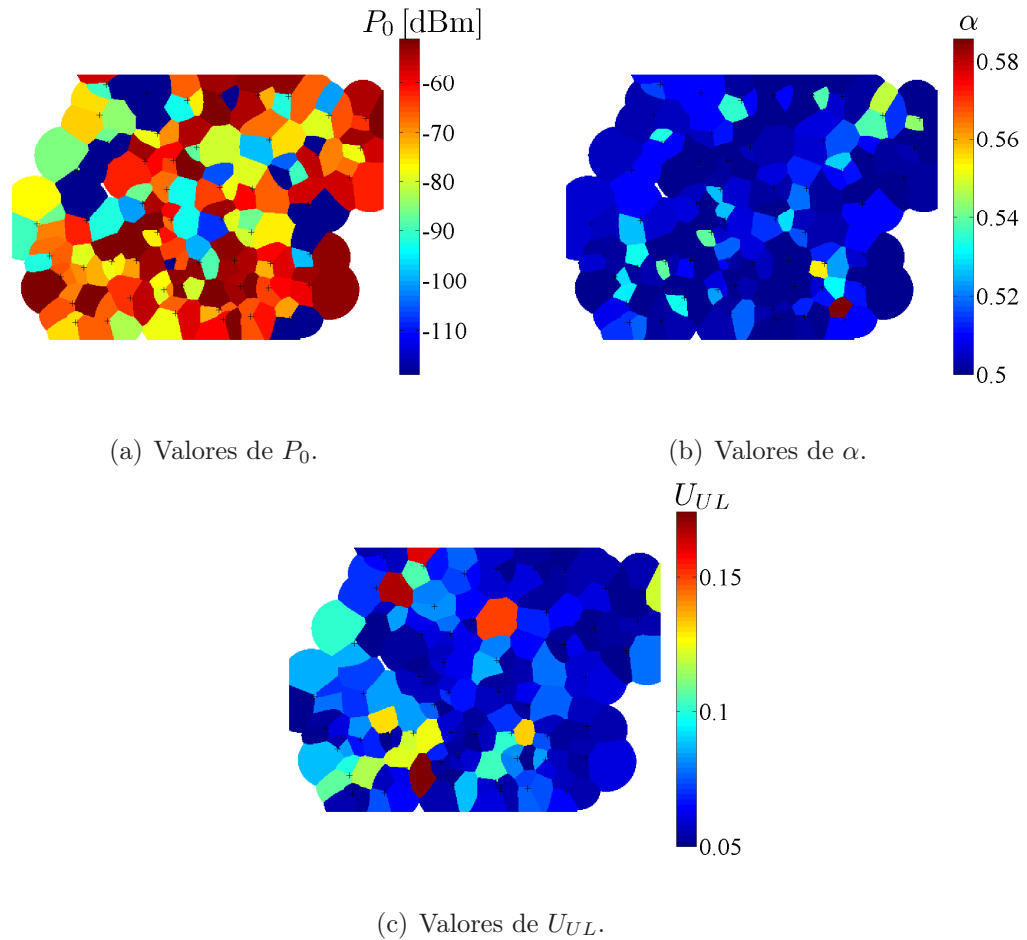


(a) Función de distribución de  $P_0$ .



(b) Función de distribución de  $\alpha$ .

FIGURA 2.17: Comparación de soluciones para el *Algoritmo 2*.

FIGURA 2.18: Solución MeM para el *Algoritmo 2*.

uniforme, para ese mismo escenario, tarda sólo una media de 300 segundos (esto es, 0.43 segundos por celda).

Una ventaja adicional de los métodos propuestos basados en la regularización del escenario es que, si se desea introducir una nueva celda en la red, no se requiere resolver el problema en el escenario completo, sino que tan sólo habría que resolver  $1 + N_{neigh}(i)$  instancias del problema, cada una de las cuales se resuelve en 0.43 segundos. Este tiempo contrasta con la estrategia de barrido de parámetros uniformes basada en el simulador, que requiere solucionar el escenario completo cada vez que se añade (o modifica) una sola celda. Esta diferencia en términos computacional es especialmente significativa cuando se planifican escenarios grandes, con centenares de celdas, como los utilizados en este trabajo.

## 2.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado dos algoritmos de planificación automática de los parámetros de control de potencia en el PUSCH de LTE para escenarios irregulares. El primero de ellos optimiza la potencia nominal,  $P_0$ , y la carga de recursos radio en el UL,  $U_{UL}$ , mientras que el segundo ajusta  $P_0$  y el factor de compensación de pérdidas de propagación,  $\alpha$ . Ambos algoritmos tienen el mismo principio de funcionamiento tanto para la búsqueda de los valores óptimos de los parámetros como para la simplificación de las irregularidades del escenario. En los algoritmos propuestos, el problema global de planificación de parámetros a lo largo de toda la red se divide en múltiples instancias del problema más simples, una por adyacente, en las que se asume un escenario regular. En estos escenarios regulares se usa un método de descenso por gradiente para encontrar la configuración de parámetros que maximiza la tasa de datos media de usuario al tiempo que se garantiza el cumplimiento de una tasa de datos de usuario mínima en el borde de celda. Una vez obtenida la mejor configuración de parámetros para cada adyacente, se calcula la configuración de parámetros de la celda bajo estudio según diversos métodos de agregación. De esta forma, el algoritmo heurístico propuesto puede manejar escenarios irregulares con una baja carga computacional, lo que es especialmente crítico cuando se planifican escenarios grandes.

La evaluación del rendimiento se ha llevado a cabo sobre un simulador estático de nivel de sistema en el que se han implementado varios escenarios reales. Los resultados para la planificación de potencia nominal y carga de red en el UL muestran que promediar las soluciones de las distintas celdas adyacentes (método MeM) obtiene los mejores resultados en cuanto a compromiso entre capacidad y cobertura, consiguiendo mejores resultados que las configuraciones uniformes de parámetros utilizadas hoy en día por los operadores. En el caso de la optimización de  $P_0$  y  $\alpha$ , son varios los métodos (MeM y MxM) que obtienen un rendimiento de red mejor que la configuración de parámetros uniforme. En términos de compromiso entre capacidad y cobertura, la solución ofrecida por el método de agregación MeM puede considerarse la más adecuada, al igual que en la optimización de  $P_0$  y  $U_{UL}$ . En cuanto a la eficiencia computacional, el uso de los algoritmos propuestos reduce el tiempo de obtención de soluciones en un orden de magnitud.



# Capítulo 3

## Estimación de capacidad en redes LTE multiservicio

En este capítulo se presentan dos problemas relacionados con la estimación de capacidad en redes LTE multiservicio. En ambos problemas, el objetivo es detectar anticipadamente cuellos de botella que puedan causar problemas de congestión en la red de acceso radio.

El capítulo se inicia con una primera sección donde se contextualiza el problema general de la estimación de capacidad de redes celulares. La segunda sección se dedica a la estimación de la capacidad del canal de control para el enlace descendente de LTE durante la fase de planificación. Finalmente, la tercera sección trata la estimación de capacidad de una celda LTE a partir de medidas de calidad de servicio durante la fase de operación.

### 3.1. Introducción

El dimensionado de red es una tarea clave en la gestión de redes de comunicaciones móviles. En dicho proceso, llevado a cabo durante las fases de planificación y operación de red, los operadores de red estiman la futura demanda de tráfico y las futuras mejoras en la capacidad de la red para detectar los cuellos de botella que supongan un problema para la calidad de servicio (QoS) ofrecida al usuario. Por desgracia, el crecimiento del tráfico y las capacidades radio no son fácilmente

predecibles, sino que dependen de las características físicas del entorno, la configuración de los equipos o la distribución espacial de los usuarios. Como consecuencia, los operadores deben revisar constantemente sus previsiones para garantizar una adecuada QoS.

En sistemas anteriores a LTE, en los que el tráfico de voz era predominante, la capacidad de la red estaba limitada por la carga efectiva de los canales de datos. Con la irrupción de los terminales móviles inteligentes (*smartphones*), los usuarios demandan ahora conexiones frecuentes de datos de baja capacidad. Estudios realizados demuestran que el tráfico de datos medio generado por un terminal inteligente es solo un 10 % del que genera un ordenador personal con conexión móvil, pero el número de conexiones es miles de veces mayor [43]. Este cambio ha provocado un incremento muy acusado del tráfico de señalización en las redes celulares. Con ello, la capacidad de los canales de control ha pasado a ser un factor limitante del rendimiento de las actuales redes móviles. En el caso de LTE, esta situación se ha recrudecido con el lanzamiento de nuevos servicios, como la voz sobre LTE (*Voice-over-LTE*, VoLTE). Estos cambios han hecho replantearse a los operadores la forma en que dimensionan sus redes. Lamentablemente, la ausencia de modelos analíticos para predecir la carga en los canales de control dificulta estas tareas de dimensionado.

Entre todos los canales de señalización de LTE, destaca por su importancia el canal de control del enlace descendente (*Physical Downlink - DL - Control Channel*, PDCCH). Este canal de control indica quién debe recibir la información, y en qué formato, del canal compartido de datos del enlace descendente (*Physical Downlink Shared Channel*, PDSCH). Si el PDCCH no funciona de forma adecuada por falta de recursos, la transmisión de datos no es posible aunque existan recursos libres en el PDSCH. Por este motivo, el PDCCH recibe gran parte de la atención de los procesos de planificación de red. Así, la disposición de un modelo del PDCCH es una herramienta imprescindible para el dimensionado previo al despliegue de una red LTE.

Aunque se disponga de modelos de rendimiento para cada uno de los canales involucrados en la comunicación, la capacidad final de una celda en funcionamiento depende de múltiples factores que son difíciles de modelar. La capacidad de celda se define como la máxima demanda de tráfico que puede servirse por una celda garantizando unos determinados requisitos de QoS. En el caso de LTE, dicha capacidad puede estar limitada por cualquiera de los recursos implicados en una

comunicación, y es por esta razón por la que el factor limitante (y que, por tanto, mide la capacidad de la celda) puede venir determinado por cualquier indicador relacionado con el tráfico (p. ej., el número de usuarios, el volumen de tráfico, la tasa de ocupación de recursos de señalización o datos de usuario en el UL o en el DL, la interferencia UL o DL, ...). Estos cuellos de botella en la capacidad de celda no son siempre los mismos, sino que dependen de factores tan diversos como el escenario de propagación, la mezcla de servicios o las funcionalidades de red disponibles, que difieren de unas celdas a otras. En estas condiciones, los modelos analíticos o de simulación del rendimiento no permiten estimar con suficiente precisión el comportamiento de cada celda, debido a la dificultad de tener en cuenta todos esos factores. Como alternativa a estos modelos tradicionales, es posible construir modelos empíricos basados en las estadísticas de rendimiento recopiladas durante la operación de la red.

En las siguientes secciones se combinan ambas aproximaciones. Por un lado, se propone un modelo analítico de rendimiento para el PDCCH basado en teoría de colas, que puede ajustarse con estadísticas de la red real. Por otro lado, se propone un modelo de regresión multivariable, construido con estadísticas de red, capaz de identificar los principales cuellos de botella en la capacidad de una celda LTE.

## 3.2. Predicción de congestión en el canal de control DL de LTE

Esta sección aborda el modelado del PDCCH con el fin de predecir cuellos de botella en este canal de señalización. Primero se formula brevemente el problema, revisando los trabajos anteriores sobre estimación del rendimiento de canales de señalización. Seguidamente se describe el funcionamiento del PDCCH, detallando su funcionalidad más importante. A continuación, se presenta el modelo de teoría de colas propuesto para el PDCCH, que es la principal contribución en este problema. Después se presentan los experimentos realizados para validar el modelo propuesto. Finalmente, se exponen las conclusiones más relevantes de esta parte del trabajo.

### 3.2.1. Formulación del problema y trabajo relacionado

El estándar LTE incluye algoritmos de reparto de recursos radio totalmente dinámicos para canales, tanto de voz como, especialmente, de datos, para maximizar la eficiencia en el uso del espectro. El alto grado de flexibilidad en el reparto de recursos radio repercute en una alta intensidad de tráfico de señalización. En LTE, el PDCCH se utiliza para transmitir los mensajes de información de control en DL (*DL Control Information*, DCI). Los mensajes DCI transportan información sobre las asignaciones de recursos en DL y en UL para todos los UE a los que se deben asignar recursos [44]. Para reducir la intensidad de tráfico de señalización que generan estas asignaciones, y con ello evitar los problemas de congestión en el PDCCH, se han propuesto por parte del 3GPP una serie de funciones avanzadas de red que analizan el comportamiento de los flujos de tráfico y establecen algoritmos de asignación de recursos adaptados a dicho comportamiento.

Una primera estrategia básica para reducir la intensidad de tráfico de señalización del PDCCH es realizar una asignación de recursos permanente para cada UE. Esta opción, sin embargo, impide aprovechar la flexibilidad que aporta la planificación dinámica de recursos (*dynamic scheduling*, DS), lo que degrada la eficiencia espectral del sistema [45]. Una opción más sofisticada es realizar una planificación semipermanente (*semi-persistent scheduling*, SPS), esto es, una asignación de recursos fija durante un periodo de tiempo determinado, que cambia para el siguiente periodo. SPS es una propuesta de compromiso para aprovechar la ventaja de la planificación dinámica en tiempo/frecuencia, asumiendo que la planificación de recursos no requiere mayor frecuencia que la duración de una trama LTE (10 ms). El 3GPP ha descrito el comportamiento del enfoque SPS en [46].

Otra posible estrategia para reducir la intensidad de tráfico de señalización en el PDCCH es la agrupación de intervalos de tiempo de transmisión (*TTI bundling*) [47]. La técnica de *TTI bundling* consiste en transmitir un grupo de paquetes repetidos, y resulta de especial utilidad en UL, donde la cobertura es el factor limitante, reduciendo las retransmisiones y, por ende, la intensidad de tráfico de señalización. Tanto SPS como *TTI bundling* son funcionalidades relevantes en el rendimiento de VoLTE. En [48], se realiza un estudio detallado del impacto que las técnicas SPS y *TTI bundling* tienen sobre el rendimiento de VoLTE. Sin embargo, estas características no están aún implementadas en la mayoría de redes LTE desplegadas. En estas condiciones, los problemas de congestión del PDCCH solo

pueden evitarse mediante un correcto dimensionado de los recursos. Para ello, es preciso estimar de manera precisa la capacidad del PDCCH celda por celda, ya que solo así se puede garantizar una adecuada QoS, especialmente de VoLTE.

Varios estudios han analizado el rendimiento del PDCCH en LTE y sus limitaciones de capacidad [49–51]. En [52], se estudia por primera vez el rendimiento del enlace descendente de la red de acceso radio de LTE bajo restricciones en los canales de control. Este estudio se amplía posteriormente en [53] con la inclusión de un análisis del rendimiento del enlace descendente ante condiciones realistas impuestas por el canal de control. En [54], se realiza un estudio similar de las restricciones impuestas por los canales de control en redes LTE que usan división en tiempo dúplex (*Time Division Duplex*, TDD). En [12], se analiza el impacto de las restricciones del canal de control sobre la capacidad de VoLTE. Se muestra que el PDCCH tiene un impacto limitante en el número de usuarios simultáneos de VoLTE. Asimismo, se compara el rendimiento de los enfoques de reparto de recursos DS y SPS, concluyendo que SPS consigue mejor rendimiento que DS en el caso de VoLTE, ya que SPS consume un menor número de recursos de control. En el ámbito de las comunicaciones máquina a máquina (*Machine-to-Machine*, M2M), estudios similares demuestran que el PDCCH es el principal factor limitante para el número máximo de usuarios que pueden planificarse simultáneamente en este tipo de comunicaciones [55–57]. En todos estos estudios, se aprecia la importancia que el PDCCH tiene en el rendimiento de muchos servicios en las redes LTE.

El control de la intensidad de tráfico del PDCCH consiste en la adaptación de los recursos asignados a este canal de señalización en función de la demanda de tráfico. Dicha adaptación puede realizarse de forma proactiva o reactiva. Los enfoques reactivos actúan sólo cuando aparece la congestión, y están basados en la observación de medidas de indicadores de rendimiento (*Performance Measurements*, PM). El equipamiento LTE suministrado por los fabricantes suele ofrecer al operador la posibilidad de monitorizar el rendimiento del PDCCH a partir de diferentes PM. Los PM suelen recogerse y almacenarse para su posterior tratamiento por medio del NMS por celda y hora. En el caso del PDCCH, los PM más relevantes son el tráfico ofrecido en el PDCCH en términos de número de asignaciones DL y UL, histogramas de la tasa de ocupación del PDCCH y la tasa de fallos de transmisión sobre el PDCCH. Si, una vez analizados estos datos, el operador detecta un problema de congestión en el PDCCH, se lleva a cabo una reasignación

de los recursos físicos destinados a los canales de datos y señalización, quitando recursos del PDSCH para dárselos al PDCCH. Por el contrario, los enfoques proactivos pretenden realizar una adecuada estimación de la capacidad de recursos de señalización, de forma que la congestión se detecte antes de que ocurra y se propongan acciones correctoras. Tal enfoque analiza la capacidad de señalización requerida y disponible [51], y, consecuentemente, se requiere de algún modelo para realizar la estimación de la capacidad de los recursos de señalización.

Toda estrategia proactiva se basa en un modelo de rendimiento de la red. En el caso del PDCCH, la mayoría de estudios están basados en herramientas de simulación [12, 49–57]. Sin embargo, la definición de un modelo analítico basado en teoría de teletráfico para la estimación de capacidad del PDCCH aportaría importantes ventajas. En primer lugar, un modelo analítico requiere bajo coste computacional, donde la estimación del rendimiento del PDCCH requiere tan sólo resolver algunas ecuaciones. Esta diferencia en el rendimiento computacional respecto a los esquemas basados en simulación es especialmente significativa cuando la red LTE tiene un número medio/alto de celdas, o cuando los procesos de replanificación son necesarios con cierta frecuencia (por ejemplo, para la adición de nuevas celdas). En segundo lugar, un modelo analítico es fácilmente integrable en una herramienta de planificación comercial. Ciertamente, esta integración puede también realizarse mediante un juego de curvas extraído a partir de resultados de herramientas de simulación. Sin embargo, estas curvas basadas en simulaciones estarán siempre limitadas en número, serán dependientes de los parámetros de simulación configurados, y nunca abarcarían todos los casos que podrían necesitar los nuevos procesos de replanificación de la red. Por último, un modelo de PDCCH no sólo proporciona ventajas acerca del rendimiento. Con un buen modelo analítico (esto es, ajustado al comportamiento real), es posible hacer además análisis más amplios y detallados acerca del comportamiento interno del PDCCH. Como contrapartida, los modelos analíticos no suelen incluir tantos parámetros y características de red como las herramientas de simulación. Por consiguiente, la ventaja de un modelo analítico vendrá condicionada por la fidelidad a la hora de reflejar resultados de red, incluso con un conjunto limitado de parámetros en relación a una herramienta de simulación de igual objetivo.

Los modelos analíticos de teletráfico basados en teoría de colas, tales como Erlang-B y Erlang-C, se han venido utilizando con éxito para estimar la capacidad de redes celulares [58]. Sin embargo, estos modelos básicos no pueden predecir el

comportamiento de la red cuando se introducen características avanzadas. Por este motivo, la mayoría de los estudios en este ámbito se han centrado en el modelado de nuevas características de la red. El punto de partida es el modelo de teoría de colas de una red celular con trasposos propuesto por Hong y Rappaport en [59]. A partir de este trabajo, se han propuestos modelos más sofisticados que tienen en cuenta distribuciones más generales del tiempo de conexión [60], correlación entre llamadas [61, 62], reintentos [63, 64], múltiples servicios [65, 66] y múltiples capas de red [67, 68]. Todos estos modelos están concebidos y validados para los canales donde se transmiten datos de usuario. Sin embargo, pocos estudios se han dedicado a modelar los canales de señalización. En [69], se describe un modelo de colas para el canal de señalización dedicado (*Standalone Dedicated Control Channel*, SDCCH) de GSM. Para LTE, en [57] se propone un modelo de cola basado en una cadena de Markov simple para estimar la congestión en el PDCCH y en el canal de acceso aleatorio (*Random Access Channel*, RACH). El modelo propuesto es limitado al no incluir varias características importantes del PDCCH, como la adaptación de enlace (*Link Adaptation*, LA) o la capacidad real del PDCCH una vez descontados los recursos de los símbolos de control que no están destinados al PDCCH. Como se muestra más adelante, estas características tienen gran impacto sobre el rendimiento del canal.

En este trabajo, se propone un modelo analítico del PDCCH basado en teoría de colas, que considera características singulares como la adaptación del enlace. Al mismo tiempo, se presentan estadísticas de rendimiento del PDCCH tomadas de una red real, que permiten validar el buen funcionamiento del modelo.

### 3.2.2. Descripción del PDCCH

El canal PDCCH se encarga de gestionar los mensajes de asignación de recursos (DCI), fundamentales en el mecanismo de envío de datos en el enlace ascendente y descendente. Los mensajes DCI incluyen información sobre la asignación de recursos en el DL tan importante como la ubicación de recursos del PDSCH, la indicación del formato de transporte, el tamaño del bloque de transporte del mecanismo híbrido automático de petición de retransmisión (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ), e información de control relacionada con el sistema de múltiples antenas (*Multiple Input Multiple Output*, MIMO). Al mismo tiempo, estos mensajes también transportan información sobre la planificación de recursos



en el UL, como la ubicación de los recursos, el formato de transporte, información sobre HARQ y comandos de control de potencia del PUSCH y del PUCCH.

La Figura 3.1 muestra la estructura básica de recursos radio para el PDCCH. En el eje de ordenadas se muestran las distintas subportadoras (12 subportadoras por PRB) y en el eje de abscisas se muestra la duración temporal de 2 subtramas (1 subtrama corresponde a 1 TTI). La transmisión de un canal PDCCH se realiza sobre uno o más elementos del canal de control (*Control Channel Elements*, CCE), que es la unidad mínima de recurso que se asigna al PDCCH. Cada CCE está formado por 9 grupos de elementos de recursos (*Resource Element Groups*, REG), que contienen 4 elementos de recursos (*Resource Element*, RE) cada uno, para un total de 36 RE. Un RE se define como una subportadora de multiplexación por división ortogonal en frecuencia (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) y un símbolo en el eje de tiempo. En la figura, se resalta la definición de RE, REG y CCE. Igualmente, se refleja cómo no todos los RE de un PRB pueden utilizarse para transmitir el PDCCH. Así, en la figura se representan aquellos RE que se usan para señales piloto y que, por tanto, no pueden asignarse para la transmisión de datos del PDCCH.

La región de control define cuántos símbolos OFDM de cada subtrama pueden usarse para el transporte de datos del PDCCH. El tamaño de la región de control puede variar entre 1 a 3 símbolos, dependiendo de la configuración establecida por el operador. El tamaño de la región de control se indica mediante el indicador de formato del canal de control (*Control Format Indicator*, CFI) en cada subtrama.

A consecuencia de la variedad de mensajes que pueden transmitirse por el PDCCH, se definen cuatro formatos de transporte en el PDCCH,  $t_f \in \{0, 1, 2, 3\}$ . Cada formato usa un número diferente de CCE,  $CCE_f(t_f) = \{1, 2, 4, 8\}$  para  $t_f \in \{0, 1, 2, 3\}$ , respectivamente. En la Tabla 3.1 se muestra cada uno de los formatos del PDCCH y la cantidad de información que puede transportar. Estos formatos se seleccionan de forma dinámica.

La selección del formato de transporte utilizado en cada momento se realiza mediante el algoritmo de LA [3, 70]. El principal objetivo del proceso de LA es seleccionar el esquema de modulación y codificación que, en función de las condiciones instantáneas de canal, garantice una tasa de error de bloque (*Block Error Rate*, BLER) objetivo. A diferencia de los canales donde se transmiten datos de usuario, en el PDCCH siempre se usa la modulación por desplazamiento de fase



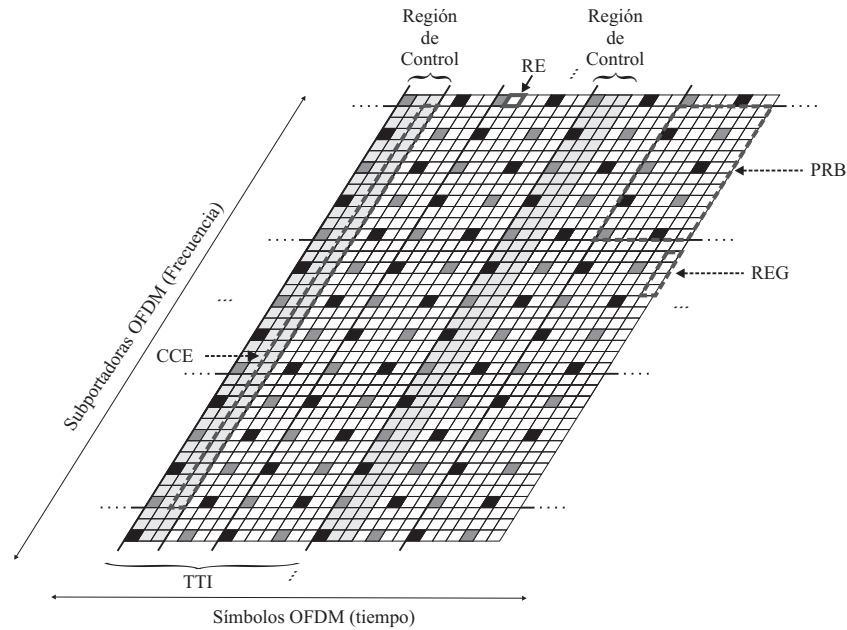


FIGURA 3.1: Estructura OFDM de recursos radio en LTE.

en cuadratura (*Quadrature Phase Shift Keying*, QPSK). Así, el eNB selecciona el formato del PDCCH (es decir, escoge un diferente ancho de banda de transmisión) dependiendo de las condiciones del canal, las cuales determinan si es necesario introducir redundancia en el mensaje. Dichas condiciones de canal se estiman a partir del indicador de calidad del canal (*Channel Quality Indicator*, CQI) y la tasa de retransmisión en el propio PDCCH. Como consecuencia de este proceso de adaptación, unas peores condiciones de propagación en el canal radio implican una mayor intensidad de tráfico del PDCCH para transmitir la misma información.

La capacidad de tráfico PDCCH de una celda viene determinada por el número de mensajes del PDCCH que se pueden servir en cada subtrama LTE. Dicho número depende del número de RE disponibles para el PDCCH y del formato de PDCCH seleccionado para cada mensaje. A su vez, el número de RE disponibles para el canal de control viene determinado por: a) la región de control, cuyo tamaño, en símbolos OFDM, se configura con el indicador de formato del canal de control (CFI), b) el ancho de banda del sistema, dado por el número de PRB, c) el

$t_f$	$CCE_f$	No. de bits del PDCCH
0	1	72
1	2	144
2	4	288
3	8	576

TABLA 3.1: Formatos de PDCCH.

número de RE de la región de control reservados para transmitir señales piloto, que viene determinado por el esquema de transmisión MIMO, d) los recursos usados en la región de control por el tamaño del canal físico de indicación del formato de control (*Physical Control Format Indicator CHannel*, PCFICH) y que, por tanto, no quedan disponibles para el PDCCH, y e) los recursos usados por el canal físico de indicación de HARQ (*Physical HARQ Indicator CHannel*, PHICH) también en la región de control [44]. De igual modo, cabe destacar que el tiempo de servicio para cada transmisión de PDCCH es 1 ms (es decir, un TTI), y, por tanto, todos los RE quedan disponibles para nuevas transmisiones en cada TTI.

La capacidad del PDCCH puede ser diferente para cada celda, según sea su configuración de los parámetros descritos en el párrafo anterior. Además, la capacidad del PDCCH puede ajustarse dinámicamente a las necesidades de tráfico, dado que el valor de CFI se envía en cada subtrama.

### 3.2.3. Modelo analítico del PDCCH

En esta sección se describe un modelo de teoría de colas para estimar el rendimiento del PDCCH. EL modelo propuesto describe de forma analítica las características del tráfico PDCCH y los procesos de asignación de recursos radio al PDCCH a nivel de celda. El tráfico entrante ofrecido al PDCCH incluye todas las peticiones que transporta el PDCCH, que son las peticiones de recursos en el DL, la asignación de recursos en el UL y otro tráfico de señalización.

Como en otros estudios, se asume que las peticiones de servicio entrantes en el PDCCH siguen una distribución de Poisson, de forma que no existe correlación entre llegadas sucesivas y el tiempo entre llegadas sigue una distribución exponencial. Igualmente, el tiempo de servicio se asume que sigue una distribución exponencial. Con las suposiciones anteriores, se propone un modelo de sistema basado en cadenas de Markov.

En la Figura 3.2 se muestra un esquema simplificado del modelo de cola considerado, donde el recurso de asignación básico es un CCE.  $N_{CCE}$  es el número de CCE disponibles (servidores de la cola). El modelo considera el proceso de LA en el PDCCH mediante la generación de cuatro flujos de entrada que pretenden reflejar los distintos formatos de transporte en el PDCCH. Cada petición de uso del PDCCH (p.ej., una indicación de asignación de recursos en el UL para un usuario)

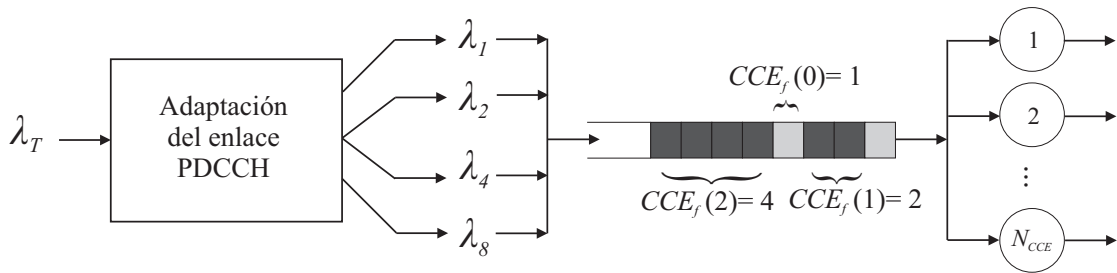


FIGURA 3.2: Modelo de cola del PDCCH.

se transmite con uno de los cuatro posibles formatos de PDCCH disponibles. Así,  $\lambda_i$  se refiere a la tasa de tráfico entrante de peticiones con el formato que usa  $i$  CCE ( $i \in \{1, 2, 4, 8\}$ ). De esta forma, la tasa de tráfico total de peticiones PDCCH,  $\lambda_T$ , se divide en cuatro flujos de tráfico, cumpliéndose siempre que  $\sum_{i \in \{1,2,4,8\}} \lambda_i = \lambda_T$ . Posteriormente, el modelo de sistema sigue una filosofía de cola “primero en llegar, primero en servirse” (*First Come First Served, FCFS*), donde las peticiones son servidas por orden de llegada, sin ninguna otra prioridad.

La Figura 3.3 muestra el diagrama de estados para el modelo propuesto en este trabajo. Cada círculo representa un estado del sistema, donde el número inscrito representa el número de CCE ocupados en ese estado. Una nueva petición de tráfico entrante incrementa el número de recursos ocupados en 1, 2, 4 u 8 CCE, según el formato de transporte seleccionado para dicha petición. La intensidad de estas transiciones se describe por la tasa de llegada de peticiones de cada formato de transporte,  $\lambda_i$ ,  $i = \{1, 2, 4, 8\}$ . A partir del estado  $N_{CCE}$ , donde se ocupan todos los CCE disponibles, las peticiones entrantes se encolan, de forma que sólo los primeros  $N_{CCE}$  se sirven en ese instante, mientras que el resto quedan a la espera de que queden recursos libres. Una vez que la petición del PDCCH ha sido servida, se liberan los CCE usados. La intensidad de estas otras transiciones se describe por la tasa de servicio de peticiones de cada estado  $n$ ,  $\mu_{i,n}$ , que se calculan dependiendo de: a) la probabilidad de que la petición ya servida se haya codificado con un formato de PDCCH,  $t_f$ , concreto, y b) el número de estados que están siendo ocupados en ese momento,  $n$ .

Asumiendo que ninguna petición de tráfico entrante se rechaza, el número de estados posibles en el sistema ( $N_S$ ) tiende teóricamente a infinito. Para reducir el espacio de memoria y la carga computacional requeridos para resolver el modelo, se acota el número total de estados posibles. En este trabajo,  $N_S$  se limita a 300.

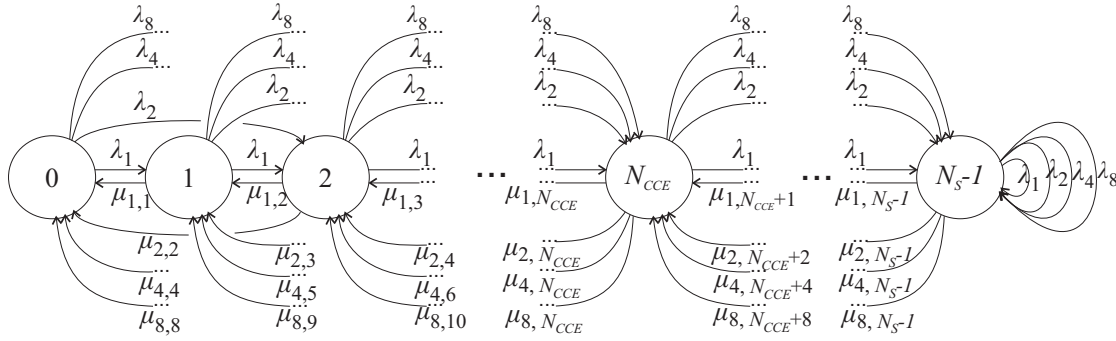


FIGURA 3.3: Diagrama de estados del modelo propuesto.

A posteriori, se confirma que con los valores de tráfico simulados, la probabilidad de llegar a ocupar ese número de estados es completamente despreciable.

Para calcular las tasas de servicio de cada estado  $n$ , es preciso considerar solo las combinaciones de peticiones entrantes que pueden haber dado lugar a una ocupación total de CCE del estado en cuestión. Por ejemplo, si en el sistema están ocupados 2 CCE, las peticiones salientes solo pueden corresponder a los formatos de transporte 1 y 2. Estas combinaciones de peticiones salientes para cada estado pueden obtenerse por medio de un proceso de enumeración explícita. Para describir el proceso de cálculo, se define  $M(n)$  como el número de combinaciones de peticiones del PDCCH de distinto tipo que pueden dar lugar al estado de ocupación  $n$  ( $\in \{0, 1, 2, 3, \dots, N_S-1\}$ ). Por definición, cada una de estas combinaciones cumple que la suma del número total de CCE de todas sus peticiones es  $n$ , expresado como

$$\sum_{t_f \in \{0,1,2,3\}} k(m, t_f) \cdot CCE_f(t_f) = n \quad , \quad (3.1)$$

donde  $k(m, t_f)$  es el número de peticiones con formato  $t_f$  en la combinación  $m$ -ésima que utilizan  $CCE_f(t_f)$  CCE. Tal como se definen,  $m \in \{1, 2, \dots, M(n)\}$ ,  $k(m, t_f) \in [0, n]$  y  $CCE_f(t_f) \in \{1, 2, 4, 8\}$ . La probabilidad de que la  $m$ -ésima combinación resulte en la ocupación del estado  $n$ ,  $P(n, m)$ , se obtiene como

$$P(n, m) = \frac{\prod_{t_f} P(t_f)^{k(m, t_f)}}{\sum_{j=1}^{M(n)} \prod_{t_f} P(t_f)^{k(j, t_f)}} \quad , \quad (3.2)$$

donde  $P(t_f)$  es la probabilidad de tener una petición de tráfico PDCCH entrante con formato  $t_f$  (es decir,  $\sum_{t_f} P(t_f) = 1$ ). El cálculo de  $P(n, m)$  tiene en cuenta

que el formato de cada petición de tráfico entrante de PDCCH no guarda relación con ninguna otra petición, y, por tanto, cada combinación se normaliza por el sumatorio de probabilidades para todas las posibilidades de estar en el estado  $n$  de forma que se cumpla  $\sum_m P(n, m) = 1$ .

Una vez calculadas las probabilidades normalizadas de cada combinación  $m$ , se calcula la tasa de servicio del estado  $n$  para cada formato  $t_f$ ,  $\mu_{t_f, n}$ , con la expresión

$$\mu_{t_f, n} = \sum_{m=1}^{M(n)} k(m, t_f) \cdot P(n, m) \quad . \quad (3.3)$$

El modelo de servicio propuesto se engloba dentro de los conocidos como sistemas de colas con llegadas por lotes multiservicio, o, según notación *Kendall*, un sistema de colas  $M^X/G/c$  [71]. En la literatura no existe una fórmula cerrada para el cálculo de la solución del sistema (esto es, de las probabilidades de régimen estacionario), y, por lo tanto, las probabilidades de cada estado han de obtenerse resolviendo el sistema lineal

$$\mathbf{\Pi} \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{\Pi} \mathbf{e} = \mathbf{1}, \quad \mathbf{\Pi} \geq \mathbf{0} \quad , \quad (3.4)$$

donde  $\mathbf{\Pi}$  es el vector de probabilidades en régimen estacionario de cada uno de los estados,  $\mathbf{Q}$  es la matriz infinitesimal generadora y  $\mathbf{e}$  es un vector columna de valor 1 en todas sus posiciones [72]. En la Figura 3.4, se presenta la matriz  $\mathbf{Q}$  del modelo propuesto, donde cada valor en la fila  $r \in \{0, 1, 2, \dots, \infty\}$  y columna  $c \in \{0, 1, 2, \dots, \infty\}$  representa la tasa de tráfico desde el estado  $r$  hacia el estado  $c$  en la Figura 3.3. Los valores de la diagonal,  $d_i$ , se ajustan para cumplir la ecuación de equilibrio  $\sum_n \mathbf{Q}(r, n) = 0$  [71, 72].

Una vez que, mediante la resolución de la ecuación (3.4), se obtiene el vector de probabilidades de estado  $\mathbf{\Pi}$ , se derivan los siguientes indicadores de rendimiento:

- El histograma de frecuencia relativa del número de CCE ocupados del PDCCH,  $f_{CCE}$ , como

$$f_{CCE}(n) = \begin{cases} \mathbf{\Pi}(n) & \text{si } n < N_{CCE} \quad , \\ \sum_{j \geq N_{CCE}} \mathbf{\Pi}(j) & \text{si } n \geq N_{CCE} \quad . \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix}
 d_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 \mu_{1,1} & d_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 \mu_{2,2} & \mu_{1,2} & d_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 0 & \mu_{2,3} & \mu_{1,3} & d_3 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 \mu_{4,4} & 0 & \mu_{2,4} & \mu_{1,4} & d_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 0 & \mu_{4,5} & 0 & \mu_{2,5} & \mu_{1,5} & d_5 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & \mu_{4,6} & 0 & \mu_{2,6} & \mu_{1,6} & d_6 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \mu_{4,7} & 0 & \mu_{2,7} & \mu_{1,7} & d_7 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 \\
 \mu_{8,8} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,8} & 0 & \mu_{2,8} & \mu_{1,8} & d_8 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 \\
 0 & \mu_{8,9} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,9} & 0 & \mu_{2,9} & \mu_{1,9} & d_9 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & \lambda_8 \\
 0 & 0 & \mu_{8,10} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,10} & 0 & \mu_{2,10} & \mu_{1,10} & d_{10} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & \lambda_4 & \lambda_8 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \mu_{8,N_{CCE}} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,N_{CCE}} & 0 & \mu_{2,N_{CCE}} & \mu_{1,N_{CCE}} & d_{N_{CCE}} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{8,N_{CCE}+1} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,N_{CCE}+1} & 0 & \mu_{2,N_{CCE}+1} & \mu_{1,N_{CCE}+1} & d_{N_{CCE}+1} & 0 & 0 \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{8,N_{CCE}+2} & 0 & 0 & 0 & \mu_{4,N_{CCE}+2} & 0 & \mu_{2,N_{CCE}+2} & \mu_{1,N_{CCE}+2} & d_{N_{CCE}+2} & 0 \\
 \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots
 \end{bmatrix}$$

FIGURA 3.4: Matriz generadora,  $\mathbf{Q}$ .

- El uso medio de CCE o carga media del sistema,  $\rho$ , como

$$\rho = \left( \sum_{n=0}^{N_{CCE}-1} \Pi(n) \cdot n + \sum_{n=N_{CCE}}^{N_S-1} \Pi(n) \cdot N_{CCE} \right) / N_{CCE} . \quad (3.6)$$

### 3.2.4. Pruebas

En este apartado se presentan las pruebas para evaluar el modelo de colas propuesto para el PDCCH. Para validar el modelo, se comparan las estimas de rendimiento obtenidas con él, con las obtenidas con un simulador del PDCCH y con medidas del rendimiento del PDCCH tomadas de una red LTE real. A continuación se describe la metodología experimental y los resultados obtenidos.

#### 3.2.4.1. Metodología experimental

La evaluación del modelo se divide en tres etapas. En una primera etapa, se comprueba la capacidad del modelo para emular diferentes comportamientos del PDCCH. Con tal fin, se utiliza un simulador dinámico del PDCCH programado en Matlab<sup>®</sup> para emular el comportamiento del PDCCH en una celda, según se define en la especificación técnica del 3GPP [44]. El simulador comprende las siguientes características: a) uso de trazas realistas de tráfico de usuario simultáneo de UL y DL, b) uso de distribución estadística de CQI de una celda real, para modelar las condiciones de canal de los usuarios de una celda y, con ello, el efecto del LA en el PDCCH, c) mecanismos de retransmisión HARQ en el PDCCH, PDSCH y PUSCH, y d) una configuración realista del canal de control (p.ej., CFI, número de CCE disponibles,...). Los parámetros de simulación más importantes se resumen en la Tabla 3.2.

Sobre el simulador se efectúan varias pruebas con diferentes escenarios, cambiando las condiciones de propagación radio y los niveles de tráfico. Por un lado, se consideran 2 escenarios teóricos, denominados S1 y S2, con condiciones de propagación distintas, que se reflejan en sendos vectores de probabilidades de uso de formatos del PDCCH. El escenario S1 pretende modelar a una celda con problemas de propagación, donde existe una mayor probabilidad de utilizar los formatos más robustos (pero menos eficientes) del PDCCH. Para ello, se fija  $\mathbf{P}(\mathbf{t}_f)^{S1} = [0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4]$ . Por el contrario, el escenario S2 modela una celda con mejores condiciones de propagación, donde existe mayor probabilidad de utilizar los formatos

menos robustos del PDCCH. Para ello, se fija  $\mathbf{P}(\mathbf{t}_f)^{\mathbf{S}2}=[0.4 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.1]$ . Los vectores de probabilidades se usan después como parámetro tanto en el simulador, como en el modelo de colas que se somete a evaluación. Por otro lado, se prueban 2 situaciones de intensidad de tráfico de señalización, baja y alta intensidad. Para ello, se configura la tasa global de peticiones del PDCCH,  $\lambda_T$ , entre 2 valores,  $\lambda_{T,low}$  y  $\lambda_{T,high}$ . Como resultado, se tienen 4 casos donde evaluar el rendimiento del modelo analítico frente al simulador, denominados *S1H* (S1 alta carga), *S1L* (S1 baja carga), *S2H* (S2 alta carga) y *S2L* (S2 baja carga).

En una segunda etapa del análisis, el rendimiento del modelo de PDCCH se compara con medidas de rendimiento reales extraídas de una red LTE en funcionamiento. El objetivo de esta segunda etapa es evaluar la capacidad del modelo de sistema para reproducir el comportamiento del PDCCH en una red real. Para realizar una comparación justa, en el modelo de sistema se configuran las mismas condiciones de tráfico y de propagación radio que en dos celdas reales.

Aunque  $\lambda_T$  se puede obtener directamente del NMS por celda y hora, las probabilidades de uso de formato del PDCCH,  $\mathbf{P}(\mathbf{t}_f)$ , no se monitorizan por la red y, por tanto, no pueden obtenerse directamente del NMS. Aun así, es posible obtener una estima razonable de dichas probabilidades por celda a partir del histograma de frecuencia relativa del CQI en esa celda,  $f_{CQI}$ , que sí está disponible en el NMS. El proceso de cálculo de  $\mathbf{P}(\mathbf{t}_f)$  sigue un proceso similar al que se describe en [52]. Para modelar el proceso de LA, se establecen tres valores  $\mathbf{CQI}_{th}=[CQI_{th,1} \ CQI_{th,2} \ CQI_{th,3}]$  que describen los umbrales de conmutación entre los distintos formatos de transporte. De esta forma, se delimitan cuatro zonas en  $f_{CQI}$ , cuyas áreas son las probabilidades de que una petición de tráfico PDCCH sea encapsulada con

Parámetro	Configuración
Indicador de formato de control, CFI	3
Ancho de banda del sistema	10 MHz
Esquema MIMO DL	2x2
Factor de grupo en PHICH, $N_g$	1
Capacidad del PDCCH, $N_{CCE}$	41
TTI	1 ms
Intervalo entre peticiones de recursos UL	10 ms
Tiempo de simulación	3600 s
LA en PDCCH	Habilitado

TABLA 3.2: Parámetros de la herramienta de simulación del PDCCH.



formato  $t_f$ , es decir,

$$P(t_f) = \begin{cases} \sum_{b=1}^{b_{CQI_{th,1}}} f_{CQI}(b) & \text{si } t_f = 3 \text{ ,} \\ \sum_{b=b_{CQI_{th,(3-t_f)}}}^{b_{CQI_{th,(4-t_f)}}} f_{CQI}(b) & \text{si } t_f = 2 \text{ , } 1 \text{ ,} \\ \sum_{b=b_{CQI_{th,3}}}^{N_{b_{CQI}}} f_{CQI}(b) & \text{si } t_f = 0 \text{ ,} \end{cases} \quad (3.7)$$

donde  $f_{CQI}(b)$  se refiere al valor de  $f_{CQI}$  para el intervalo  $b$ . Las áreas con peor CQI corresponden a mensajes con un formato de PDCCH que ocupa mayor número de CCE (es decir, el área bajo la  $f_{CQI}(b)$  con peores valores de CQI se asocia con  $CCE_f = 8$ , y así sucesivamente). En los equipos a los que se ha tenido acceso,  $f_{CQI}$  se construye con 16 intervalos en el NMS, que corresponden a los 16 posibles valores enteros de CQI ( $b \in \{0, 1, \dots, 15\}$ ,  $N_{b_{CQI}} = 16$ ). Por desgracia, la configuración exacta de los umbrales de conmutación no se conoce, por lo que es necesario estimarlos a partir de las medidas de red. Para realizar dicha estimación, se lleva a cabo un proceso de ajuste, cuyo objetivo es minimizar el error absoluto entre el histograma de frecuencia relativa de ocupación de CCE,  $f_{CCE}$ , de la celda real y el resultante del modelo de colas implementado, expresado como

$$e = \sum_{b_{CCE}=1}^{N_{b_{CCE}}} | f_{CCE}^R(b_{CCE}) - f_{CCE}^M(b_{CCE}) | \text{ ,} \quad (3.8)$$

donde  $b_{CCE}$  es el índice del intervalo en la  $f_{CCE}$  de la red (superíndice  $R$ , de red) o del modelo (superíndice  $M$ , de modelo). La función  $f_{CCE}^M$  se calcula directamente a partir del vector de probabilidades en régimen estacionario,  $\mathbf{\Pi}$ . En los cálculos, los intervalos del histograma se definen equiespaciados con un incremento de 0.05 al igual que en los equipos reales a los que se ha tenido acceso (es decir,  $N_{b_{CCE}}=1/0.05=20$ ).

En la Tabla 3.3 se muestran estadísticas de las condiciones de propagación radio y de tráfico de las dos celdas reales utilizadas en las pruebas. En concreto, se representan el valor mínimo, máximo, medio y la desviación estándar del CQI de celda, la tasa de ocupación media del PDCCH y la tasa de llegadas de peticiones de tráfico al PDCCH (medida en llamadas por TTI), separada en asignaciones

Celda 1				
Indicador de rendimiento	Min	Max	Media	Std
$\overline{CQI}$	8.15	11.09	9.44	0.62
$\rho$ [%]	4.32	80.39	24.47	22.24
$\lambda_{PDCCH,UL}$ [ll/TTI]	0.07	4.19	1.12	1.16
$\lambda_{PDCCH,DL}$ [ll/TTI]	0.02	1.53	0.5	0.44
Celda 2				
Indicador de rendimiento	Min	Max	Media	Std
$\overline{CQI}$	8.39	14.81	13.04	1.13
$\rho$ [%]	3.48	53.96	17.13	13.47
$\lambda_{PDCCH,UL}$ [ll/TTI]	1.6e-4	5.99	1.82	1.55
$\lambda_{PDCCH,DL}$ [ll/TTI]	2.4e-5	2.37	0.85	0.66

TABLA 3.3: Estadísticas de rendimiento del PDCCH en las celdas estudiadas.

de recursos UL y DL, obtenidos de dos celdas LTE reales cada hora durante una semana. De los valores CQI promedio, se puede deducir que la Celda 1 (C1) experimenta unas condiciones de propagación radio sensiblemente peores en promedio que las que experimenta la Celda 2 (C2). Esta situación se traduce en una mayor tasa de ocupación del PDCCH en C1, aunque los valores de demanda de tráfico sean inferiores que en C2.

A la hora de configurar el modelo del PDCCH, de todas las medidas disponibles por hora, se seleccionan para cada celda dos muestras distintas, con el objetivo de captar el rendimiento de una misma celda en períodos de medida con baja y alta intensidad de tráfico de señalización. En dicha selección, se intenta que una de estas medidas refleje un valor bajo de  $\lambda_T$ , y que la otra medida refleje un valor alto de  $\lambda_T$ . Así, se establecen 4 juegos de parámetros para el modelo, denominados  $C1H$ ,  $C1L$ ,  $C2H$  y  $C2L$ , que representan las medidas del PDCCH en las celdas C1 y C2 en condiciones de alta y baja intensidad de tráfico de señalización, respectivamente.

En cada celda y periodo de medida, los umbrales de CQI,  $CQI_{th,i}$ , se ajustan individualmente. Por tanto, se calcula un vector para cada celda y medida ( $\mathbf{CQI}_{th}^{C1}$  y  $\mathbf{CQI}_{th}^{C2}$ ) mediante el proceso de optimización descrito previamente. Una vez ajustado el modelo, se evalúa la desviación en la tasa de ocupación media de CCE,  $\rho$ , y la suma del error absoluto en los histogramas de uso de CCE,  $e$ , entre el modelo ajustado y la medida real del PDCCH extraída en cada celda.

En un tercer experimento, el análisis se extiende a un amplio grupo de celdas en una red LTE real. Este experimento pretende probar que el modelo propuesto sirve para reflejar el comportamiento del PDCCH en cualquier celda, y no sólo

Red A (180 celdas)				
Indicador de rendimiento	Min	Max	Media	Std
$\overline{CQI}$	6.38	11.45	8.16	0.71
$\rho$ [%]	1.58	80.39	41.15	10.08
$\lambda_{PDCCH,UL}$ [ll/TTI]	0.77	4.19	1.61	0.59
$\lambda_{PDCCH,DL}$ [ll/TTI]	0.22	1.84	0.95	0.26
Red B (49 celdas)				
Indicador de rendimiento	Min	Max	Media	Std
$\overline{CQI}$	6.86	14.83	11.33	2.08
$\rho$ [%]	3.68	53.96	8.64	7.4
$\lambda_{PDCCH,UL}$ [ll/TTI]	0.001	4.78	0.57	0.75
$\lambda_{PDCCH,DL}$ [ll/TTI]	0.001	1.86	0.35	0.35

TABLA 3.4: Estadísticas de rendimiento del PDCCH en Red A y Red B.

en los casos particulares usados en la segunda etapa. Para extender la validez del análisis, se emplean 2 juegos de datos distintos tomados de 2 redes LTE con diferentes características, denominadas Red A y Red B. La Red A está formada por 180 celdas que dan cobertura a una amplia zona metropolitana, con una mezcla de celdas pequeñas, medianas y grandes, y diversas condiciones de tráfico. En cambio, la Red B está formada por 49 celdas que cubren una zona densamente poblada, con celdas pequeñas, buenas condiciones de propagación radio y alta intensidad de tráfico. La Tabla 3.4 refleja los valores de los indicadores del PDCCH para ambas redes.

Mediante el proceso de optimización para el ajuste del modelo, se calcula un vector de umbrales de CQI,  $\mathbf{CQI}_{th}$ , para cada celda y red ( $\mathbf{CQI}_{th}^{RedA}(c)$  para la celda  $c$  de la Red A). Una vez calculados los umbrales, se promedian los vectores de umbrales de CQI para todas las celdas de cada red, lo que resulta en un único vector de umbrales de CQI para todas las celdas de una red,  $\overline{\mathbf{CQI}_{th}^{RedA}}$  y  $\overline{\mathbf{CQI}_{th}^{RedB}}$ . Al promediar los valores de los umbrales en una red, se asume que existe un único vector de umbrales de CQI en una red LTE. En teoría, los eNB permiten una configuración específica por celda de los umbrales de CQI (es decir,  $\mathbf{CQI}_{th}^{RedA}(c)$ ). En la práctica, los operadores suelen configurar el mismo valor para todas las celdas, lo que justifica la operación de promediado realizada en este punto.

Con el juego de umbrales común de la red y el histograma de frecuencia relativa de CQI propio de cada celda, se obtiene el vector de probabilidades de formatos de transporte del PDCCH. Así, se dispone de un modelo de sistema de cada celda  $c$  de la red A o B, con el tráfico de PDCCH específico de cada celda, extraído de

Caso Modelo de sistema	S1H		S1L		S2H		S2L	
	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod
$\lambda_T$ [ll/TTI]	5.58		0.338		11.65		1.06	
$\rho$ [%]	68.27	65.82	5.25	5.19	72.24	73.23	6.46	6.74
$e$ [%]	0.87		0.18		0.67		0.23	

TABLA 3.5: Comparación entre el modelo analítico y el simulador del PDCCH.

medidas reales,  $\lambda_T^{RedA/B}(c)$ , y el vector de probabilidad  $\mathbf{P}(\mathbf{t}_f, c)$  estimado a partir de las medidas de red,  $\mathbf{P}^{RedA/B}(\mathbf{t}_f, c)$ .

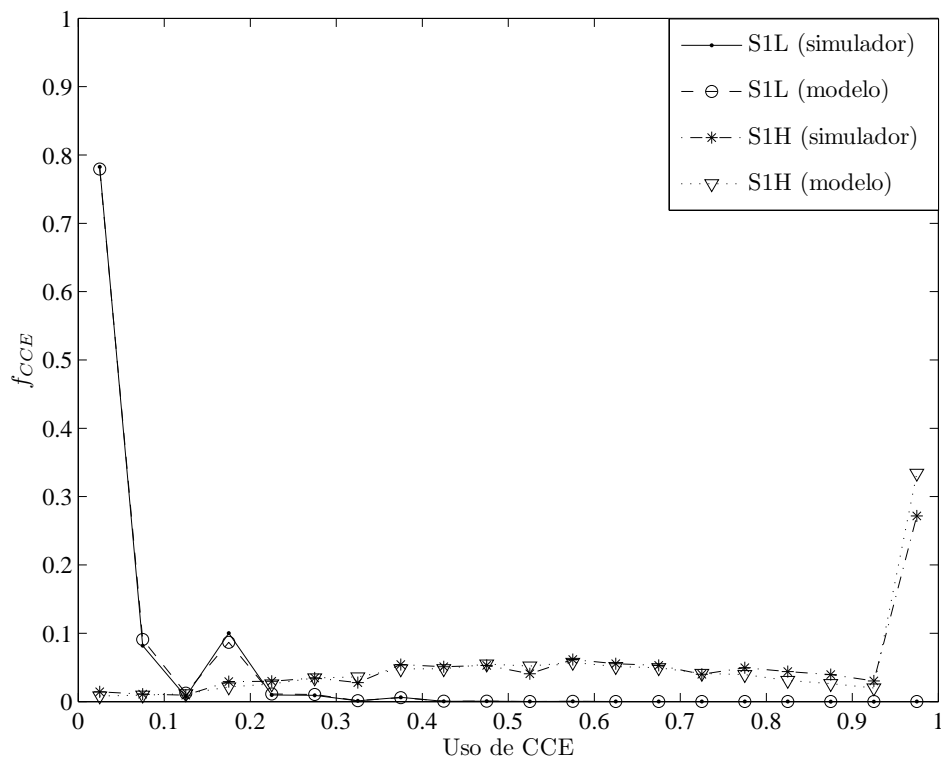
En este tercer experimento, debido al gran número de comparaciones entre el modelo y las medidas reales, los indicadores de rendimiento que se comparan son solo los percentiles del 20, 50 y 80% obtenidos a partir del histograma de frecuencia relativa acumulada del uso del PDCCH de cada celda.

### 3.2.4.2. Resultados

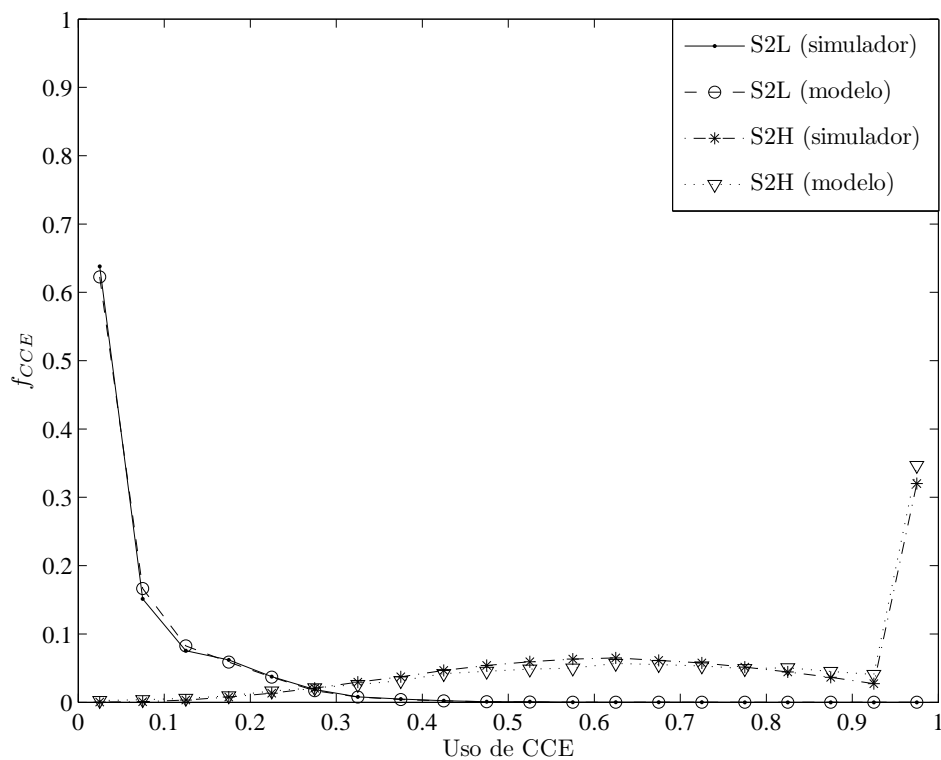
El primer experimento muestra la capacidad del modelo para reflejar distintas condiciones de propagación e intensidad de tráfico del PDCCH. La Tabla 3.5 muestra los principales indicadores de rendimiento del PDCCH para los casos S1H, S1L, S2H y S2L, que pretenden representar distintas condiciones de propagación e intensidad de tráfico del PDCCH. El parámetro  $\lambda_T$  indica el tráfico entrante configurado en el PDCCH para cada escenario. El parámetro  $\rho$  refleja la carga media del sistema resultante, tanto para la herramienta de simulación como para el modelo de sistema. En la última fila, se muestra el error de estimación de la  $f_{CCE}$  del modelo con respecto a la de la simulación.

Se observa en la tabla que las diferencias en las estimas de carga del PDCCH entre el simulador y el modelo de sistema son pequeñas para las cuatro pruebas configuradas, con una diferencia absoluta máxima de  $68.27\% - 65.82\% = 2.45\%$  en el experimento S1H y una diferencia mínima de  $5.25\% - 5.19\% = 0.06\%$  en el experimento S1L. Además, el error de estimación de  $f_{CCE}$ ,  $e$ , siempre se sitúa por debajo del 1%.

El buen comportamiento del modelo en este primer experimento se confirma en las Figuras 3.5 a) y b), donde se comparan los histogramas de uso de CCE extraídos de las simulaciones y del modelo de sistema, para los escenarios S1 y S2, respectivamente.



(a) Histograma de frecuencia relativa de uso de CCE para S1H y S1L.



(b) Histograma de frecuencia relativa de uso de CCE para S2H y S2L.

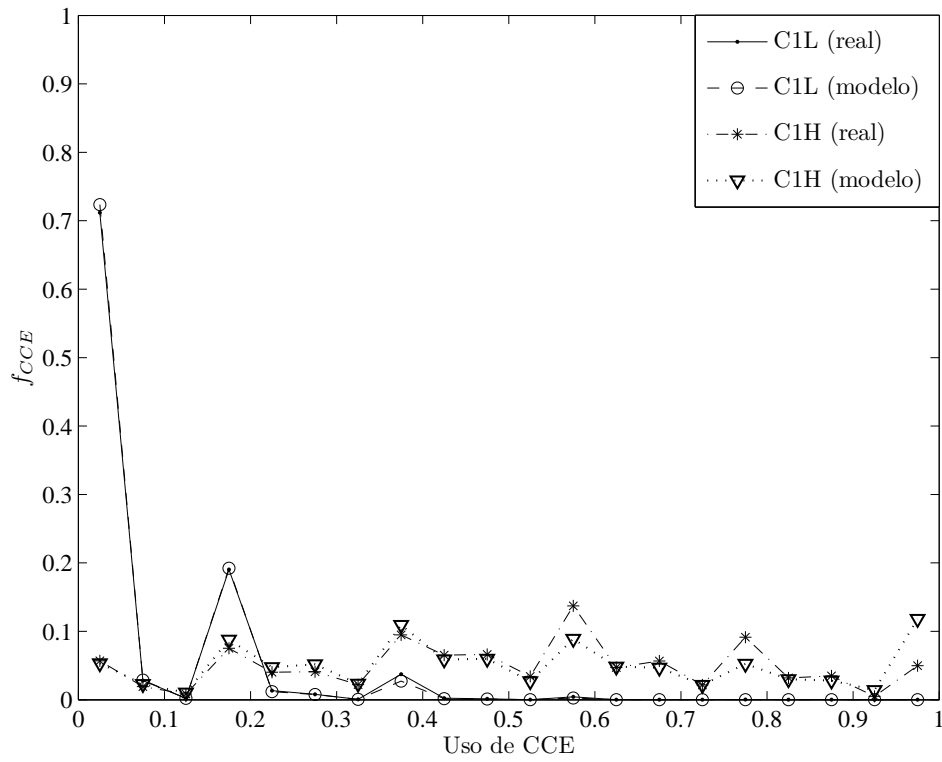
FIGURA 3.5: Comparación entre el modelo analítico y el simulador del PDCCH.

Caso Modelo de sistema	C1H		C1L		C2H		C2L	
	Real	Mod	Real	Mod	Real	Mod	Real	Mod
$\lambda_T$ [ll/TTI]	4.64		0.375		6.639		1.34	
$\rho$ [%]	50.09	50.07	7.73	7.24	53.96	58.73	7.18	5.14
$e$ [%]	1.29		0.15		1.32		0.95	

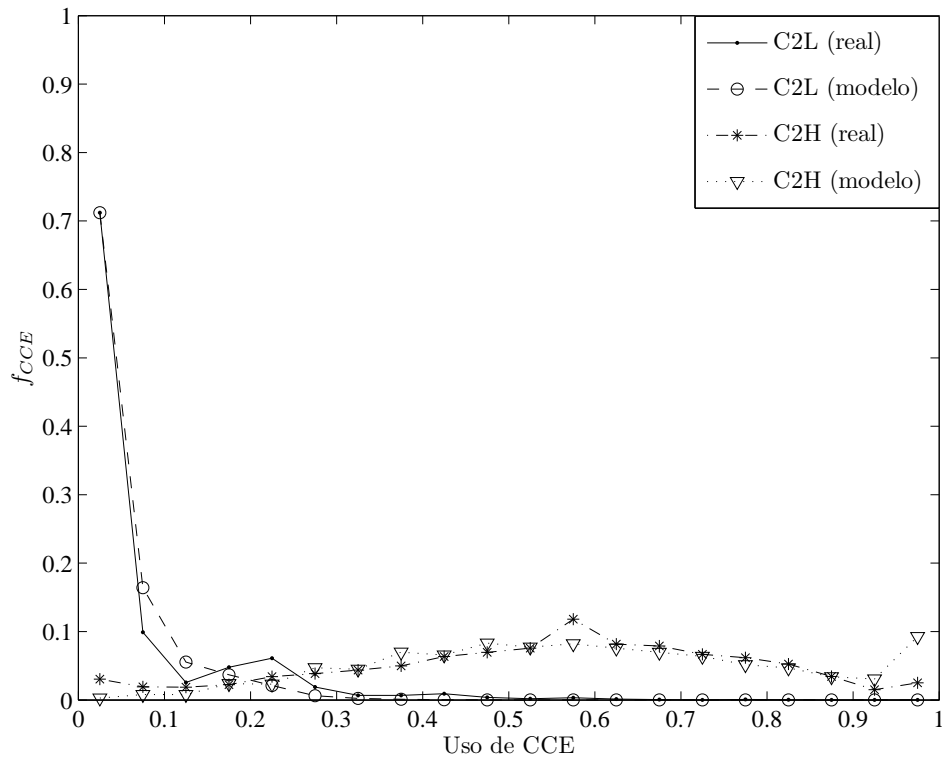
TABLA 3.6: Comparación entre el modelo analítico y el PDCCH en celdas reales.

En el segundo experimento, se comparan las estimas construidas con el modelo con las medidas de las 2 celdas reales en distintas horas. Recuérdese que la principal diferencia de este segundo experimento respecto al primero es el uso de distribuciones de CQI reales. En la Tabla 3.6 se detallan los principales indicadores que comparan resultados del modelo de sistema propuesto y de las celdas reales para la segunda etapa de análisis. El parámetro  $\lambda_T$  indica de nuevo el tráfico entrante en el PDCCH para cada escenario en llegadas por TTI. De la tabla, se deduce que el modelo estima de forma precisa las condiciones de carga del PDCCH para estas 2 celdas reales. En concreto, el máximo error de estimación en la carga del PDCCH es del 4.77 % para el caso C2H, y el mínimo error de estimación de  $\rho$  es del 0.02 % en el caso C1H. El error de estimación para el histograma de frecuencia relativa de uso de CCE,  $e$ , alcanza un valor máximo de 1.32 % para el caso C2H y encuentra su mínimo en el 0.15 % del caso C1L. Las Figuras 3.6 a) y b) representan los histogramas de frecuencia relativa del uso de CCE para el modelo de sistema propuesto y las celdas reales estudiadas en las condiciones de los experimentos C1H y C1L, y, C2H y C2L, respectivamente. De nuevo, se observa que las curvas de  $f_{CCE}$  obtenidas a partir del modelo de sistema y de las celdas reales LTE en cada uno de los casos están prácticamente superpuestas.

En el tercer experimento, se comparan las estimas del modelo con las medidas reales tomadas en 2 conjuntos de celdas pertenecientes a 2 redes. La principal diferencia con el segundo experimento es que, en este caso, el juego de umbrales de CQI para la adaptación del enlace del PDCCH no se ajusta celda a celda, sino que se comparte entre todas las celdas de la misma red. Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la comparación de los diferentes percentiles de uso de CCE extraídos del modelo de red y de los indicadores de rendimiento de la red real en la Red A y en la Red B, respectivamente. A modo indicativo, en ambas figuras, el eje de abscisas representa el índice de celda en la red correspondiente y el eje de ordenadas representa el porcentaje de uso de CCE. Para facilitar la comparación entre curvas, las celdas se han ordenado con respecto al valor del percentil del



(a) Histograma de frecuencia relativa del uso de CCE para C1H y C1L.



(b) Histograma de frecuencia relativa del uso de CCE para C2H y C2L.

FIGURA 3.6: Comparación entre modelo analítico y el PDCCH en celdas LTE reales.

50 % de su  $f_{CCE}$  en la red real, representando a la izquierda de la figura los valores más bajos. No se muestra en las figuras el resultado del proceso de ajuste de los umbrales de CQI en cada una de las redes, que resulta en  $\mathbf{CQI}_{th}^{RedA}=[9.59 \ 11.34 \ 11.86]$  y  $\mathbf{CQI}_{th}^{RedB}=[10.28 \ 10.84 \ 11.87]$ .

En la Figura 3.7, que corresponde a la Red A, se identifican tres zonas con facilidad. En una primera zona, de la celda 1 a la celda 40, formada por las celdas con baja intensidad de tráfico del PDCCH, el modelo falla al predecir los valores del percentil del 20 % de uso de CCE. Este error en la estimación se debe fundamentalmente a la baja resolución de los histogramas de uso de CCE extraídos de la red real. En una segunda zona, de la celda 40 hasta la celda 140, constituida por celdas con intensidad de tráfico media del PDCCH, la estimación realizada por el modelo se ajusta a las medidas reales en todos los percentiles de uso de CCE. Por último, en una tercera zona, desde la celda 141 a la celda 180, que comprende las celdas con alta intensidad de tráfico del PDCCH, el modelo propuesto sobreestima los valores del percentil del 80 %. Esta limitación del modelo puede deberse a la suposición de que el tiempo de servicio en el PDCCH es exponencial, cuando en realidad es constante (1 TTI). Esta simplificación, que facilita la formulación del modelo, funciona razonablemente bien para el resto de percentiles de uso.

En la Figura 3.8 se muestran los resultados de aplicar el modelo en la Red B. En la Red B, las celdas son más pequeñas y las condiciones de propagación radio mejores, lo que hace que los valores de carga en el PDCCH sean menores con respecto al número de peticiones cursadas. En estas condiciones, la falta de resolución de los histogramas de uso de CCE impide calcular el percentil del 20 % (y en algunos casos, del 50 %) del histograma de frecuencia relativa de uso de CCE en las celdas con poco tráfico. Aun así, en la figura se muestra que, en las celdas donde se pueden calcular, los percentiles del 50 % y 80 % estimados se ajustan bien a los medidos. No obstante, de forma similar a lo que ocurre en la Red A, el modelo sobreestima los valores medidos en las celdas con mayor intensidad de tráfico en el PDCCH.

Se cierra el estudio con una medida de la carga computacional del método. En este sentido, puede decirse que el tiempo requerido para resolver el modelo en las redes A y B en un ordenador personal con 2.6 GHz de frecuencia de reloj y 8 GB de memoria RAM es de 54 s y 14.7 s, respectivamente (0.3 s por celda de media). Con este tiempo de ejecución, es posible abordar el estudio del PDCCH en grandes áreas geográficas.



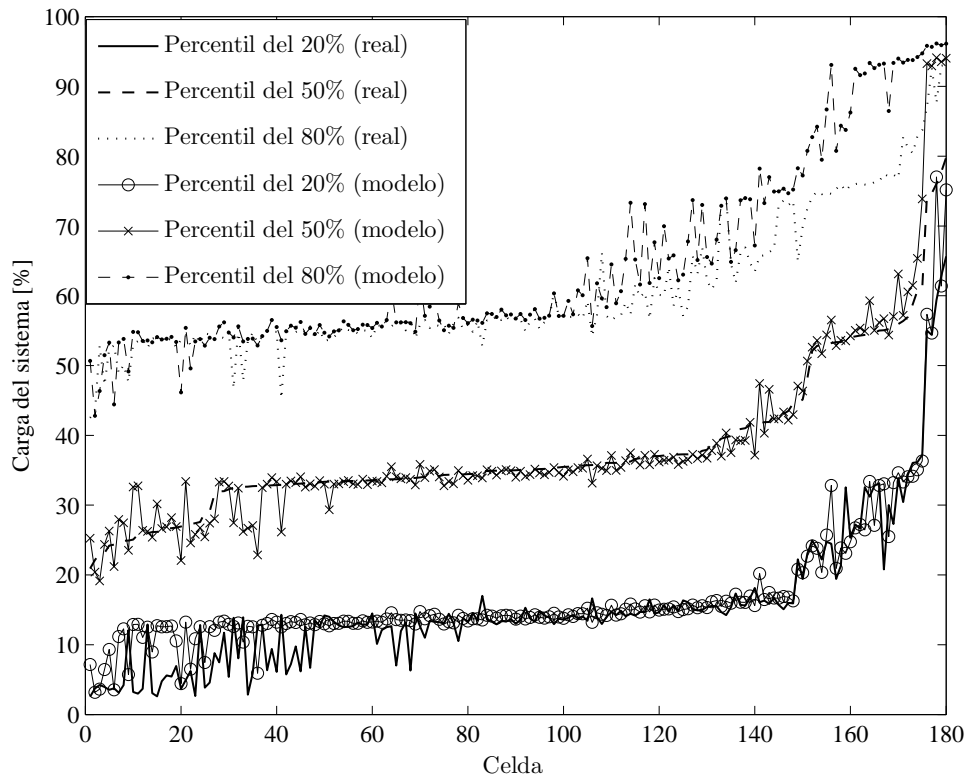


FIGURA 3.7: Aplicación del modelo sobre grupo de celdas en Red A.

### 3.2.5. Conclusiones

En este estudio se ha desarrollado un modelo de tráfico basado en teoría de colas para el PDCCH. El modelo desarrollado considera características propias del PDCCH, como la adaptación de enlace y los distintos formatos de transporte en el PDCCH. Asimismo, el modelo incluye parámetros que permiten su ajuste con medidas extraídas de una red real. Con dicho modelo, es posible obtener estimas de los principales indicadores de rendimiento del PDCCH celda por celda.

El modelo del PDCCH propuesto se ha validado primero comparando sus estimas con las obtenidas con un simulador dinámico del PDCCH. Los resultados han demostrado la capacidad del modelo de reflejar el histograma de frecuencia relativa de carga del PDCCH con diferentes condiciones de propagación y tráfico en la red, si se conocen los porcentajes de uso de cada uno de los formatos de transporte del PDCCH. En este caso, el error en la estima de la carga del PDCCH ha sido siempre inferior al 3% en términos absolutos y 5% en términos relativos, lo que demuestra el buen comportamiento del modelo.

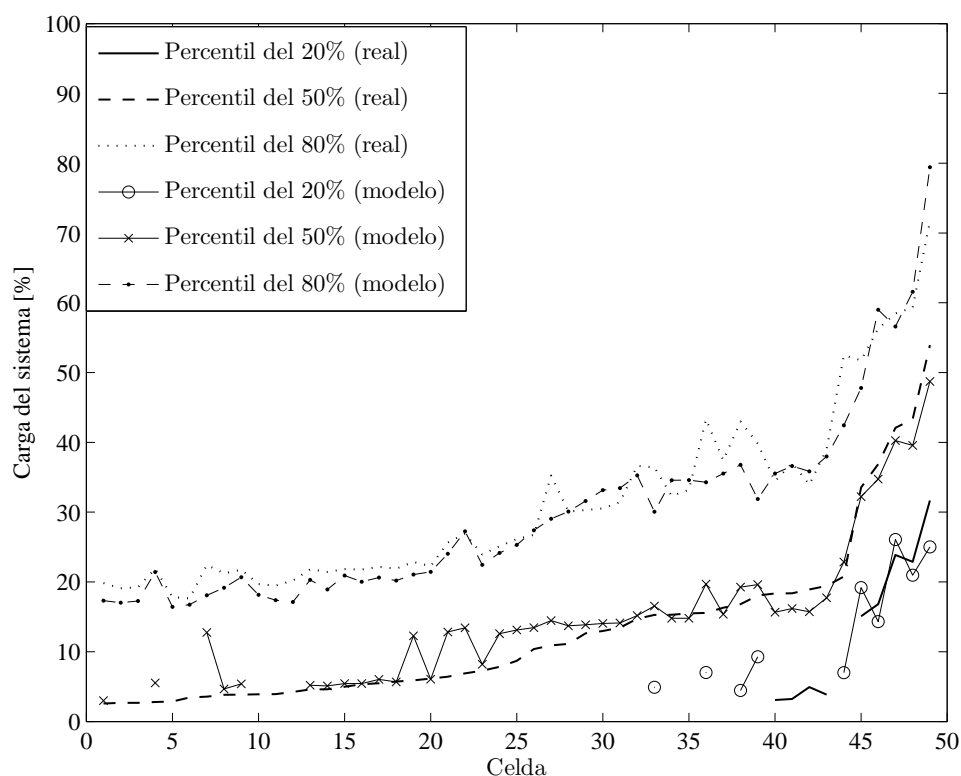


FIGURA 3.8: Aplicación del modelo sobre grupo de celdas en Red B.

Posteriormente, el modelo propuesto se ha comparado con medidas de dos celdas operativas. Para ello, se ha ajustado el modelo con medidas reales tomadas en horas del día con distintas intensidades de tráfico en el PDCCH. En este proceso, ha sido necesario ajustar los umbrales del modelo del proceso de adaptación del enlace en el PDCCH, que sirven para determinar el porcentaje de uso de cada uno de los formatos del PDCCH. Una vez ajustados los umbrales, los resultados obtenidos muestran que las estimas de los indicadores de rendimiento del PDCCH más relevantes en ambas celdas con distintas condiciones de tráfico se ajustan de forma precisa a las medidas de red. En concreto, el error máximo en la estima de la carga del PDCCH ha sido de un 5% en términos absolutos.

Finalmente, se ha extendido la comparación a dos agrupaciones de celdas provenientes de dos redes diferentes, con características topológicas dispares. En este caso, se ha demostrado que el modelo de colas propuesto para el PDCCH predice con precisión los percentiles del histograma de frecuencia relativa acumulada de carga del PDCCH, aunque sobreestima los percentiles altos de carga del PDCCH. En cualquier caso, el error medio en la estima de la mediana de la carga del

PDCCH en los 2 escenarios está por debajo del 2 %, lo que demuestra la validez del modelo.

A la luz de estos resultados, puede concluirse que el modelo analítico del PDCCH propuesto puede usarse para predecir de forma conservadora el histograma de frecuencia relativa de carga del PDCCH. Por su baja carga computacional, este modelo puede integrarse en una herramienta de dimensionado de los recursos de una celda a partir de medidas de la red real.

### 3.3. Estimación de capacidad de celda en redes LTE multiservicio

En esta sección se aborda el problema de la estimación de la capacidad de celda a partir de medidas reales de rendimiento de red. La sección se inicia formulando el problema y revisando los trabajos anteriores relacionados con la estimación de capacidad de sistemas celulares. Seguidamente se describe la metodología para estimar la capacidad de celda en una red LTE multiservicio con estadísticas de red, que es la principal contribución en este punto. A continuación se presentan los resultados de la metodología sobre un juego de datos tomados de una red real. Finalmente, se exponen las conclusiones más relevantes de esta parte del trabajo.

#### 3.3.1. Formulación del problema y trabajo relacionado

La capacidad de una celda se define como la máxima demanda de tráfico que una celda puede servir de forma que se garanticen unos umbrales mínimos de QoS. Cuando la demanda de tráfico supera el límite de capacidad de una celda, la QoS baja a niveles inaceptables para el operador. Como la demanda de tráfico en una red celular no es fija, sino que varía en el espacio y en el tiempo, es imprescindible realizar una estimación precisa de la capacidad de cada celda del sistema, para así garantizar una adecuada QoS con la mínima inversión posible [14].

Estimar la capacidad de celda es relativamente simple cuando la red ofrece un único servicio (p.ej., llamadas de voz). Sin embargo, estimar la capacidad de celda en un entorno multiservicio es una tarea complicada, ya que no todos los servicios requieren los mismos recursos para funcionar (p.ej., una llamada de voz frente a

QCI	Tipo de servicio	Prioridad	Retardo máximo	Tasa de error de paquete	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100ms	$10^{-2}$	Voz conversacional
2		4	150ms	$10^{-3}$	Vídeo en tiempo real
3		3	50ms	$10^{-3}$	Juegos en tiempo real
4		5	300ms	$10^{-6}$	Vídeo en diferido
.....					
5	Non-GBR	1	100ms	$10^{-6}$	Señalización IMS
6		6	300ms	$10^{-6}$	Vídeo en diferido, servicios TCP
7		7	100ms	$10^{-3}$	Voz, vídeo en tiempo real, juegos interactivos
8		8	300ms	$10^{-6}$	Vídeo en diferido, servicios TCP
9		9	300ms	$10^{-6}$	Vídeo en diferido, servicios TCP

TABLA 3.7: Características de QCI estandarizados.

una sesión de descarga de vídeo en tiempo real), ni exigen los mismos niveles de QoS (p.ej., transmisión de ficheros de datos en contraposición con llamadas de voz). Cualquier metodología que se proponga estimar la capacidad de celda en un escenario con múltiples servicios debe garantizar que todos los servicios cumplan sus requerimientos de QoS de forma simultánea. Para facilitar la gestión de la QoS, en LTE se define una clasificación de los servicios según sus requisitos de QoS [73]. En la Tabla 3.7 se muestran las características de cada uno de los identificadores de clase de QoS (*QoS Class Identifier*, QCI) estandarizados [73]. En la tabla, los QCI se clasifican según requieran una tasa de datos garantizada (*Guaranteed Bit Rate*, GBR) o no garantizada (non-GBR). En la última columna, se muestran servicios típicos asociados a cada QCI.

En la literatura, se han propuesto diversos métodos teóricos para determinar la capacidad de celda en diferentes tecnologías de acceso radio, como GSM [4], UMTS [4] o LTE [74]. Estos enfoques analíticos se basan en simplificaciones que facilitan el tratamiento matemático del problema. Sin embargo, la capacidad de una celda real depende de muchos factores que son difícilmente predecibles, y que son cambiantes en el espacio y en el tiempo. Ejemplos de estos factores son la mezcla de servicios demandados, las prestaciones de los terminales, la funcionalidad avanzada de la red o las condiciones de propagación y movilidad de usuario. La mezcla de servicios condiciona la capacidad de la celda porque no todos los usuarios demandan la misma cantidad de servicios o tienen los mismos requisitos de QoS. La capacidad de celda también depende de la funcionalidad de los terminales y equipamiento de red. Las prestaciones de los terminales difieren dependiendo del tipo de terminal (p.ej., teléfono convencional, teléfono inteligente, tableta, ordenador personal, ...), cuya distribución entre tipos puede variar dependiendo de la zona geográfica en donde se sitúa la celda (p.ej., negocios, ocio, transporte, rural, ...) y puede cambiar

con el tiempo. Por su parte, la funcionalidad de red depende de la versión del equipamiento de red desplegada en la celda, que difiere de unas celdas a otras, y que también se actualiza con el tiempo. Por último, las condiciones de propagación y movilidad en una celda LTE afectan a su eficiencia espectral por el proceso de adaptación del enlace, lo que se traduce en una capacidad de celda diferente dependiendo del entorno radio. Todos estos factores hacen que la capacidad de cada celda de una red LTE sea distinta. Por consiguiente, la estimación de capacidad solo se puede hacer correctamente si todas esas particularidades se tienen en cuenta.

Para hacer frente a esta diversidad, algunos estudios estiman la capacidad de celda por medio de simulaciones. En cualquier caso, es virtualmente imposible realizar simulaciones de todas las posibles combinaciones de los factores comentados anteriormente. Como alternativa, en algunos trabajos se usan medidas de indicadores de rendimiento de la red para mejorar la precisión del proceso de estimación de capacidad. El beneficio de estos enfoques basados en medidas de red es su inherente capacidad para tener en cuenta las peculiaridades de cada celda, que se extraen de su comportamiento medido, y, por tanto, real.

En [75], se propone una metodología de dimensionado basada en medidas de rendimiento recogidas de cada elemento de la red para una red de acceso múltiple por división de código de banda ancha (*Wideband Code Division Multiple Access*, WCDMA). De igual manera, en [76] se propone un modelo de regresión multivariable para estimar la capacidad máxima de una celda con tecnología de acceso de paquetes de alta velocidad en el canal descendente (*High Speed Downlink Packet Access*, HSDPA) a partir de medidas estadísticas de red. Sin embargo, ninguno de estos estudios abarca la estimación de capacidad de celda en una red multiservicio LTE.

En este trabajo, se propone una metodología novedosa para estimar la capacidad de celda en cada una de las celdas de un sistema LTE multiservicio a partir de medidas de rendimiento de una red LTE real. La metodología propuesta aprovecha la clasificación de los servicios realizada en LTE según su QCI [73]. Tal división se utiliza para definir diferentes requerimientos de QoS para cada servicio. De forma similar a [76], el núcleo del método es un modelo de regresión lineal multivariable construido con medidas estadísticas del rendimiento de la red. Dicho enfoque se extiende aquí considerando diferentes restricciones de QoS para cada QCI (esto es, para servicios de distinta naturaleza). De esta manera, el foco se pone en la experiencia de usuario más que en el rendimiento de la red. A diferencia de [76], la

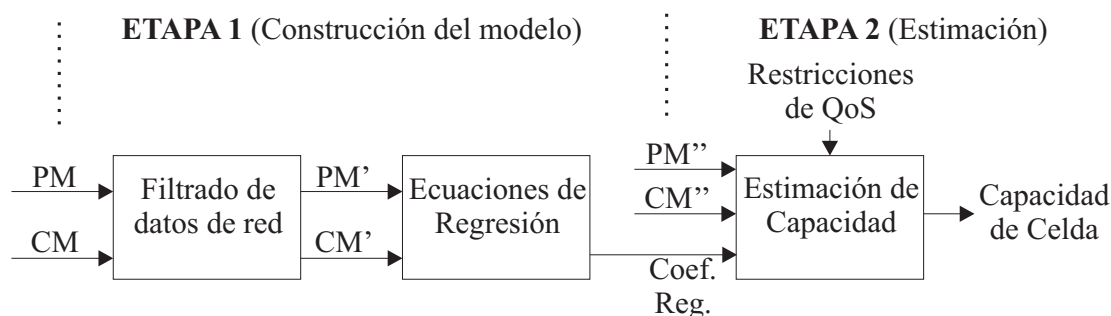


FIGURA 3.9: Diagrama de flujo para la estimación de capacidad de celda.

metodología propuesta maneja tanto servicios cuya QoS depende de la tasa media de transferencia de datos, como servicios sensibles al retardo.

### 3.3.2. Método de estimación de la capacidad de una celda LTE con múltiples servicios

La metodología desarrollada pretende estimar la capacidad de cada celda en un sistema celular LTE sometido a una serie de restricciones específicas para cada flujo de tráfico o QCI. Para ello, se construye un modelo de regresión a partir de medidas de indicadores de rendimiento tomadas directamente de la red real. Este modelo de regresión refleja la relación que existe entre las variables de tráfico que definen la capacidad de celda y los indicadores de rendimiento donde se establecen las restricciones de QoS.

La Figura 3.9 ilustra el diagrama de flujo del proceso de estimación. Como se aprecia en la figura, las entradas al método son las estadísticas de rendimiento (*Performance Management settings*, PM) y los datos de configuración (*Configuration Management settings*, CM) de la red. Ambas informaciones se obtienen del NMS con una cierta resolución temporal (típicamente, 1 hora). A partir de ahí, el proceso de estimación consta de dos etapas.

En la primera etapa, se construye el modelo de rendimiento de una celda LTE que relacione las medidas estadísticas de calidad (QoS) con los valores de los PM y CM en toda la red LTE. Este modelo se deriva por medio de un método de regresión clásico. Como en todo proceso de regresión, primero se filtran los datos de entrada (PM y CM). El proceso de filtrado trata de seleccionar aquellas muestras que son significativas para la estimación de la capacidad. Con este propósito, se seleccionan tan sólo las medidas de hora cargada en cada día, eliminando el resto de horas.

Con los datos filtrados (PM' y CM'), se derivan las ecuaciones de regresión que describen de forma matemática el modelo de rendimiento. La salida principal de esta primera etapa son los coeficientes de regresión que relacionan de forma lineal las variables del modelo.

En la segunda etapa, se utiliza el juego de ecuaciones de regresión de la etapa anterior para estimar la capacidad celda a celda con una serie de restricciones previstas por el operador con anterioridad. Dichas restricciones pueden ser diferentes para cada tipo de servicio. Por ejemplo, se puede imponer como restricción de QoS el retardo máximo en servicios de voz y una tasa de transferencia de datos mínima para el servicio de descarga de datos de propósito general. El proceso de estima puede realizarse a partir de datos de configuración y rendimiento distintos de los utilizados para construir el modelo de regresión (PM'' y CM''). El resultado de esta etapa es la estima de la capacidad de celda, expresada como la magnitud máxima de algunos de los indicadores que sirven para cuantificar la demanda de tráfico.

### 3.3.2.1. Ecuaciones de regresión

El núcleo del método es un Modelo de Regresión Lineal Multivariable Multi-Servicio (*Multi-Service Multiple Linear Regression*, MS-MLR), construido a partir de las estadísticas disponibles en el NMS. Este modelo está formado por  $N_{eq}$  ecuaciones, cada una de las cuales sirve para estimar uno de los indicadores de QoS del conjunto de servicios ofrecidos en la red. En esas ecuaciones, debe existir al menos una ecuación por cada clase de servicio o QCI que tenga alguna restricción de QoS. Cada ecuación del modelo MS-MLR se formula de la siguiente manera:

$$p_{QoS}^{(j,l)}(c, h) = \beta_0^{(j,l)} + \sum_{i=1}^k \beta_i^{(j,l)} \cdot p_i(c, h) + \epsilon^{(j,l)}(c, h) \quad , \quad (3.9)$$

donde  $p_{QoS}^{(j,l)}(c, h)$  es el valor del  $l$ -ésimo indicador de QoS del servicio con QCI  $j$  en la celda  $c$  y la hora  $h$ ,  $i$  se usa para indexar variables,  $p_i(c, h)$  son los valores de PM y CM seleccionados como variables independientes candidatas a formar parte de la ecuación de regresión final en la celda  $c$  y la hora  $h$ ,  $\beta_i^{(j,l)}$  es el coeficiente de regresión para cada  $p_i$ ,  $k$  es el número de variables independientes candidatas en el modelo MS-MLR y  $\epsilon^{(j,l)}(c, h)$  es el término de error. En el caso general, se consideran todas las clases de QCI disponibles (es decir,  $j \in \{1, 2, \dots, 9\}$  [73]).

Los objetivos del análisis de regresión son:

- 1) encontrar la combinación con el menor número de variables independientes para cada clase de QCI  $j$  y restricción de QoS  $l$  que pueda explicar las variaciones de  $p_{QoS}^{(j,l)}$ , y
- 2) calcular una estima precisa,  $\hat{\beta}_i^{(j,l)}$ , de los coeficientes de regresión,  $\beta_i^{(j,l)}$ .

Un primer paso en la construcción del modelo es seleccionar  $k$  variables independientes candidatas de entre aquéllas de las que se disponen datos. Como punto de partida, se necesita disponer de una amplia cantidad de variables candidatas, ya que es difícil definir, a priori, cuáles son las más relevantes. Las variables seleccionadas pueden clasificarse en parámetros de configuración del sistema e indicadores de rendimiento, y estas últimas a su vez en variables de tráfico, variables de calidad de conexión y variables de calidad de servicio.

El juego de variables candidatas depende de la funcionalidad de red suministrada por el fabricante y el conjunto de servicios ofrecidos en cada momento por el operador. Tras un análisis exhaustivo de los datos disponibles en el NMS de diversas redes LTE reales, en este estudio se considera el siguiente juego de variables iniciales:

a) Parámetros de configuración del sistema:

- $BW$ : Ancho de banda del sistema en MHz.
- $CFI\_mode$ : Configuración del indicador de formato de control (CFI) [fijo/automático].
- $PUCCH\_SR\_users$ : Número máximo de usuarios a los que se permite enviar petición de asignación de recursos (*Scheduling Request*, SR) en el PUCCH.
- $PUCCH\_CQI\_users$ : Número máximo de usuarios a los que se permite reportar medidas de CQI en el PUCCH.

b) Variables de tráfico:

- $ActiveUE\_DL$ : Número medio de usuarios simultáneos con datos que transmitir en DL por TTI.



- $TrPerc_{QCI}^{(1)}, \dots, TrPerc_{QCI}^{(9)}$ : Porcentaje de tráfico sobre el total para las clases de QCI 1 a 9 (es decir,  $\sum_i TrPerc_{QCI}^{(i)} = 100\%$ ).

c) Variables de calidad de conexión:

- $Avg\_CQI$ : CQI medio.
- $\sigma_{CQI}$ : Desviación estándar de la distribución de CQI.
- $CQI\_percent\_5\%$ : Percentil del 5% de la distribución de CQI.
- $CQI\_percent\_10\%$ : Percentil del 10% de la distribución de CQI.
- $HARQ\_fail\_ratio\_DL$ : Tasa de fallos por retransmisiones HARQ en DL.
- $RLC\_retx\_ratio\_DL$ : Tasa de retransmisiones en la capa de control del enlace radio (*Radio Link Control*, RLC) en modo con confirmación de recepción (*Acknowledged Mode*, AM) en el enlace descendente.
- $PDCCH\_ack\_ratio$ : Tasa de asignaciones de recursos confirmadas en el PDCCH.

d) Variables de QoS:

- $TH_{QCI}^{(1)}, \dots, TH_{QCI}^{(9)}$ : Tasa de datos de usuario en DL a nivel de capa del protocolo de convergencia de paquetes de datos (*Packet Data Convergence Protocol*, PDCP) para las clases de QCI 1 a 9.
- $VoLTESatisfUsRatio$ : Porcentaje de llamadas de voz sobre LTE cuyo retardo en el 99% de los paquetes en el UL está por debajo del retardo objetivo definido por el operador para este servicio (típico, 80 ms).

El siguiente paso es la construcción de las ecuaciones de regresión, para lo cual se obtiene del NMS un juego de datos compuesto por datos de configuración y medidas de rendimiento por celda y hora. A partir de estos datos, se construyen las  $N_{eq}$  ecuaciones de regresión. Cada una de ellas tiene la estructura de la ecuación (3.9), que relaciona todas las variables independientes candidatas,  $p_i(c, h)$ , con una de las variables de QoS,  $p_{QoS}^{(j,l)}(c, h)$ . Partiendo del modelo de regresión completo, que incluye todas las variables, se sigue un proceso de eliminación similar al descrito en [76]. De esta manera, se identifican cuáles son las variables más relevantes para predecir el valor de cada indicador de QoS,  $p_{QoS}^{(j,l)}$ . El proceso se describe a continuación.

Para cada clase de QCI  $j$  e indicador de QoS  $l$  en dicho QCI, se construye una ecuación con las  $k$  variables disponibles. Para cada ecuación, se sigue un proceso iterativo en el que se elimina la variable menos significativa en cada iteración. El criterio para seleccionar la variable menos significativa consiste en escoger aquella variable cuyo  $p$ -valor es mayor. Dicho  $p$ -valor indica la probabilidad de que el coeficiente de regresión de esa variable sea nulo [58]. Este  $p$ -valor se puede calcular con herramientas de análisis estadístico a partir del análisis de los residuos. Después de cada iteración, se construye un modelo de regresión más simple (a la vez que menos preciso), con una variable menos. El proceso iterativo de simplificación del modelo acaba cuando la fiabilidad de la ecuación de regresión cae por debajo de un determinado umbral. En este trabajo, se usa como criterio para medir la fiabilidad de la estimación el coeficiente de determinación,  $R^2$  [58]. En concreto, se detiene el proceso de eliminación de variables cuando  $R^2 \leq 0.7$ .

El proceso de construcción del modelo acaba con una ecuación de regresión para cada clase de QCI  $j$  e indicador de QoS  $l$  con un número de variables  $k'(j, l) < k$ , que, en general, es distinto para cada clase  $j$  e indicador  $l$ . Nótese que las medidas estadísticas se recogen para toda la red y, por tanto, la ecuación simplificada resultante será válida para todas las celdas. De esta manera, se genera un único modelo de regresión multiservicio, que es aplicable a todas las celdas de la red.

### 3.3.2.2. Estimación de la capacidad de celda

Una vez se dispone de un modelo de estimación del rendimiento, que consta de  $N_{eq}$  ecuaciones simplificadas, se estima la capacidad de celda. Para ello, se define primero el valor umbral de los indicadores de QoS de cada QCI,  $p_{QoS,target}^{(j,l)}$ , a partir de las restricciones de QoS definidas por el operador. Después, se elige una variable de capacidad entre todas las variables independientes de la ecuación relacionadas con el tráfico, que se denota por  $p_{i_0}$ . El valor de la variable de capacidad  $p_{i_0}$  en cada celda  $c$  se despeja de la ecuación (3.10), obteniendo:

$$\bar{p}_{i_0}^{(j,l)}(c) = \frac{p_{QoS,target}^{(j,l)} - \hat{\beta}_0^{(j,l)} - \sum_{i=1, i \neq i_0}^{k'(j,l)} \hat{\beta}_i^{(j,l)} \cdot \bar{p}_i(c)}{\hat{\beta}_{i_0}^{(j,l)}}, \quad (3.10)$$

donde  $p_{QoS,target}^{(j,l)}$  es el valor umbral objetivo para el indicador de QoS  $l$ -ésimo del QCI  $j$ ,  $\hat{\beta}_i^{(j,l)}$  son las estimas de los coeficientes de regresión obtenidas en la

construcción de las ecuaciones,  $k'(j, l)$  es el número de variables independientes en cada ecuación simplificada, y  $\bar{p}_i(c)$  es la media de todas las medidas de hora cargada del indicador  $i$  en la celda  $c$ . Aplicando (3.10), se obtiene un valor de capacidad de celda,  $\bar{p}_{i_0}^{(j,l)}(c)$ , para cada clase de QCI  $j$  y restricción de QoS  $l$  para cada celda  $c$ . Finalmente, la capacidad de celda,  $CC$ , se calcula teniendo en cuenta el criterio de QoS más restrictivo, con la expresión:

$$CC(c) = \min_{(j,l)} \left( \bar{p}_{i_0}^{(j,l)}(c) \right) . \quad (3.11)$$

El operador  $\min(\bullet)$  asegura que se cumplen todas las restricciones de QoS, siempre y cuando la variable de capacidad no supere en la celda  $c$  el valor  $CC(c)$ . Es importante recordar que el valor de  $CC$  se obtiene a partir de medidas de red agregadas por hora. De esta forma, se elimina la dependencia de factores, como las localizaciones específicas de los usuarios y las fluctuaciones de los niveles de interferencia entre celdas.

### 3.3.3. Pruebas

A continuación se describen los experimentos realizados para evaluar el método propuesto para estimar la capacidad de celda. Como en secciones anteriores, se describe primero la metodología experimental y después los resultados obtenidos.

#### 3.3.3.1. Metodología experimental

El método propuesto se valida construyendo el modelo de regresión a partir de datos de una red real. Los datos de configuración y rendimiento (es decir, CM y PM) se toman del NMS de una red LTE real. El segmento de red analizado se compone de 656 celdas en una zona densamente poblada. En dicha red, se usan dos portadoras a 700 MHz y 2100 MHz, con un ancho de banda de sistema de 10 MHz y 5 MHz, respectivamente. Las estaciones base usan 2 antenas de transmisión y los posibles modos de transmisión MIMO (*Transmission Modes*, TM) son TM 0 (uso de una única antena) y TM 2 (multiplexación espacial en lazo abierto con diversidad por retardo cíclico). Las estadísticas de rendimiento se recogen por celda y hora durante 6 días, resultando en un juego de datos de  $24 \cdot 6 \cdot 656 = 94464$

muestras. Para obtener medidas robustas, el análisis se restringe a las muestras de la hora cargada en cada celda y día.

Las variables  $CFI\_mode$ ,  $PUCCH\_SR\_users$  y  $PUCCH\_CQI\_users$  tienen los mismos valores en todas las celdas y días. Lo mismo se puede decir de otros parámetros de configuración importantes, tales como la configuración de antena o los modos de transmisión MIMO, que son globales en toda la red. Estas variables, aunque son importantes para el rendimiento de la red, no son significativas en esta red de cara al análisis de regresión para la estimación de capacidad de celda, puesto que no aportan información que diferencia a unas celdas de otras. Como consecuencia, las variables mencionadas se descartan como variables candidatas. Con las 11 variables independientes restantes, se inicia el proceso iterativo de selección de variables para la ecuación de regresión (es decir,  $k = 11$ ).

En la red del estudio, el operador sólo considera tres valores de QCI: QCI 1 para el servicio de VoLTE, QCI 5 para señalización del subsistema multimedia IP (*IP Multimedia Subsystem*, IMS) y QCI 8 para el servicio de datos sobre el protocolo de control de transmisión (*Transmission Control Protocol*, TCP). Además, el tráfico de QCI 5 es fundamentalmente de señalización con la red troncal, siendo su volumen despreciable comparado con el soportado por las demás clases de servicio. En concreto, el servicio con QCI 5 representa un 0.02 % del tráfico total en la red bajo estudio, frente a un 2.68 % para el servicio con QCI 1 y un 97.30 % para el servicio con QCI 8. Por esta razón, el análisis de regresión se ha realizado para los servicios con QCI 1 y 8 ( $j \in \{1, 8\}$ ). Las cifras expuestas de volumen de tráfico por clase de QCI ponen de manifiesto que el principal servicio en la red LTE estudiada es la transmisión de datos por TCP, relegando a las llamadas VoLTE a un segundo plano. Para aumentar la robustez de las estimas, las muestras horarias en las cuales no hay conexiones de VoLTE en una celda se descartan del análisis. Como resultado de filtrar las muestras de hora cargada que tienen conexiones VoLTE, el número de muestras usadas para derivar las ecuaciones de regresión asciende a 2222.

Para cada uno de los flujos de tráfico considerados, QCI 1 y QCI 8, se selecciona al menos un indicador de QoS,  $\bar{p}_{i_0}^{(1,1)}$  y  $\bar{p}_{i_0}^{(8,1)}$ . En este caso, la variable de QoS seleccionada para el QCI 1 y QCI 8 es  $VoLTESatisfUsRatio$  y  $TH_{QCI}^{(8)}$ , respectivamente, atendiendo a la naturaleza de los servicios que se cursan con ambos QCI (VoLTE es sensible al retardo y la transmisión de datos sobre TCP es sensible a la tasa de datos de usuario). Expresado formalmente,

$p_{QoS}^{(1)} = VoLTESatisfUsRatio$  y  $p_{QoS}^{(8)} = TH_{QCI}^{(8)}$ . El umbral de retardo máximo permitido por la norma para  $VoLTESatisfUsRatio$  es 80 ms [73]. Nótese que en este trabajo se usa un único criterio de calidad para cada una de las clases de servicio estudiadas ( $l \in \{1\} \forall j$ ), y, por tanto,  $N_{eq} = 2$ .

Se comparan dos modelos de regresión: el modelo completo (*Full Model*, FM), que incluye las 11 variables independientes candidatas, y un modelo simplificado (*Simplified Model*, SM), con el mínimo número de variables que permiten una estimación aceptable según el criterio del coeficiente de determinación definido en la Sección 3.3.2.1. La bondad de estos modelos se evalúa por la precisión de sus estimas, medida por el valor del coeficiente de determinación, y su simplicidad, medida por el número de variables que contienen.

Finalmente, se utiliza el modelo simplificado para estimar la capacidad de cada una de las celdas del sistema. Para ello, se elige primero la variable de capacidad, entre las variables independientes que permanecen en el modelo simplificado. Después, se estima la capacidad de celda sustituyendo en la ecuación (3.11) los valores promedio de los PM obtenidos en cada celda en la hora cargada.

### 3.3.3.2. Resultados

La Tabla 3.8 presenta diversas estadísticas de rendimiento en la hora cargada que permiten comprobar el estado de la red LTE considerada. En la tabla se muestran los valores mínimos, medio, máximo y la desviación estándar de los PM analizados, que pretenden reflejar la dispersión de valores entre las distintas celdas de la red. El amplio rango de valores observados en la Tabla 3.8 es una evidencia de las diferentes condiciones de la red, lo que justifica la necesidad de estimar la capacidad celda por celda.

La Tabla 3.9 muestra los resultados obtenidos por el modelo completo, FM. La segunda y tercera columna muestran los coeficientes de regresión y los  $p$ -valores al estimar con FM el indicador  $VoLTESatisfUsRatio$  para la clase de QCI 1, mientras que la cuarta y quinta columna hacen lo propio para el indicador  $TH_{QCI}^{(8)}$  de la clase de QCI 8. También se indica el valor de  $R^2$  para ambas estimaciones. Por claridad, los superíndices denotan el QCI al que corresponde cada uno de los parámetros.

En la tabla, se observa que las variables  $BW$  y  $TrPerc_{QCI}^{(8)}$  tienen los  $p$ -valores más altos en el modelo completo para el QCI 1 y 8, respectivamente. Por tanto,

	Min	Media	Max	Std
Variables independientes, $p_i$				
$BW$ [MHz]	5	-	10	-
$ActiveUE\_DL$	0.0038	0.47	8.3	0.57
$TrPerc_{QCI}^{(1)}$ [%]	0	2.68	87.26	5.88
$TrPerc_{QCI}^{(8)}$ [%]	12.56	97.30	100	5.9
$Avg\_CQI$	5.81	8.84	14.73	1.41
$\sigma_{CQI}$	0.294	0.98	3.13	0.24
$CQI\_percent\_5\%$	1.44	4.11	12.54	1.15
$CQI\_percent\_10\%$	2.01	4.91	13.56	1.28
$HARQ\_fail\_ratio\_DL$ [%]	1.9	6.35	13.97	1
$RLC\_retr\_ratio\_DL$ [%]	0	6.2e-2	3.26	0.11
$PDCCH\_ack\_ratio$ [%]	27.7	97.26	99.75	3.93
Indicadores de QoS, $p_{QoS}^{(j)}$				
$TH_{QCI}^{(8)}$ [Mbps]	1.28	10.93	47.33	4.99
$VoLTESatisfUsRatio$ [%]	0	91.77	100	24.33

TABLA 3.8: Estadísticas de rendimiento de la red considerada.

<i>Estadísticos de regresión</i>				
Coeficiente de determinación	$R^{2(1)}=0.09$		$R^{2(8)}=0.755$	
<i>Análisis del modelo</i>				
	$\hat{\beta}_i^{(1)}$	$P^{(1)}$	$\hat{\beta}_i^{(8)}$	$P^{(8)}$
$Constant$ ( $\beta_0$ )	-1160	0.003	-83.2	0.05
$BW$ [MHz]	3.57e-5	0.93	1.6e-3	6e-260
$ActiveUE\_DL$	-2.83	0.004	-2.61	1.6e-118
$TrPerc_{QCI}^{(1)}$ [%]	11.1	0.005	0.57	0.18
$TrPerc_{QCI}^{(8)}$ [%]	11	0.005	0.56	0.19
$Avg\_CQI$	4.96	0.01	2.53	5e-33
$\sigma_{CQI}$	-13.2	3e-4	-1.53	1.3e-4
$CQI\_percent\_5\%$	-1.5	0.7	-0.9	0.04
$CQI\_percent\_10\%$	-3.17	0.49	1.46	3.5e-3
$HARQ\_fail\_ratio\_DL$ [%]	-1.45	0.03	-1.12	9e-52
$RLC\_retr\_ratio\_DL$ [%]	10	0.04	0.056	0.91
$PDCCH\_ack\_ratio$ [%]	1.56	6e-30	0.08	2.4e-8

TABLA 3.9: Resultados del modelo de regresión completo.

estas variables son las que se eliminan en la primera iteración del proceso de simplificación del modelo completo.

A partir de los valores de  $R^2$  en la parte superior de la Tabla 3.9, se deduce que FM predice  $TH_{QCI}^{(8)}$  eficazmente, pero falla en la estimación de  $VoLTESatisfUsRatio$ . En concreto,  $R^{2(1)}=0.09$  y  $R^{2(8)}=0.755$ . Un análisis más detallado muestra que los malos resultados del modelo para el QCI 1 se deben al poco tráfico de VoLTE

existente en el juego de datos disponible, inferior a 0.24 conexiones VoLTE de media por celda y hora. Como consecuencia, las medidas de *VoLTESatisfUsRatio* no son estadísticamente robustas, sino que son extremadamente sensibles a la experiencia sufrida por usuarios específicos de VoLTE, que se conectan en cada celda desde una posición y con unas condiciones radio que pueden no ser significativas del resto de usuarios.

Para respaldar la anterior afirmación, se construye un juego de datos reducido en el que sólo se consideran medidas de horas y celdas con más de 3 conexiones VoLTE. Con esas muestras, se elabora un nuevo modelo completo FM con todas las variables independientes del modelo FM original desglosadas por QCI, y añadiendo 3 variables específicas del QCI 1, como son la tasa de paquetes perdidos a nivel PDCP en DL y UL y el porcentaje de PRB ocupado por el QCI 1. Con este modelo extendido, se consigue estimar el indicador *VoLTESatisfUsRatio* con un valor de  $R^2=0.4$ , sensiblemente mejor al obtenido para el modelo FM original. Más importante aún, los  $p$ -valores más bajos, que muestran las variables más relevantes, corresponden a las nuevas variables específicas de la clase de QCI 1. Este hecho respalda la idea de que, con tan poco tráfico de VoLTE en la red, la estimación de *VoLTESatisfUsRatio* viene determinada por la experiencia sufrida por las conexiones individuales de usuarios VoLTE, y no por el comportamiento global de la red. Este modelo extendido con tantas variables se descarta por la dificultad de integrarlo en una herramienta de planificación.

Resulta interesante que, en la Tabla 3.9, la variable  $BW$  tiene el mayor y el menor  $p$ -valor en los QCI 1 y 8, respectivamente. Es lógico que, cuanto mayor es  $BW$ , mayor es la tasa de datos de usuario del QCI 8, y, por ello, el  $p$ -valor correspondiente a la variable  $BW$  en la ecuación de regresión del QCI 8 es bajo. Sin embargo, el tráfico generado por el servicio de QCI 1 se prioriza sobre el QCI 8 por el planificador de recursos en LTE, lo cual causa que los servicios de clase de QCI 1 sean muy poco sensibles al uso de recursos compartidos (p.ej., disponibilidad de  $BW$ ), y, por ello, se tiene un valor más alto del  $p$ -valor de la variable  $BW$  para la ecuación de regresión de la clase de QCI 1. Aun así, se prevé que, en el futuro, la variable  $BW$  también tendrá  $p$ -valores pequeños para el QCI 1 cuando el tráfico de VoLTE sea lo suficientemente grande como para que los usuarios de voz compitan por los recursos.

Para la construcción del modelo SM, se parte de las variables del modelo FM



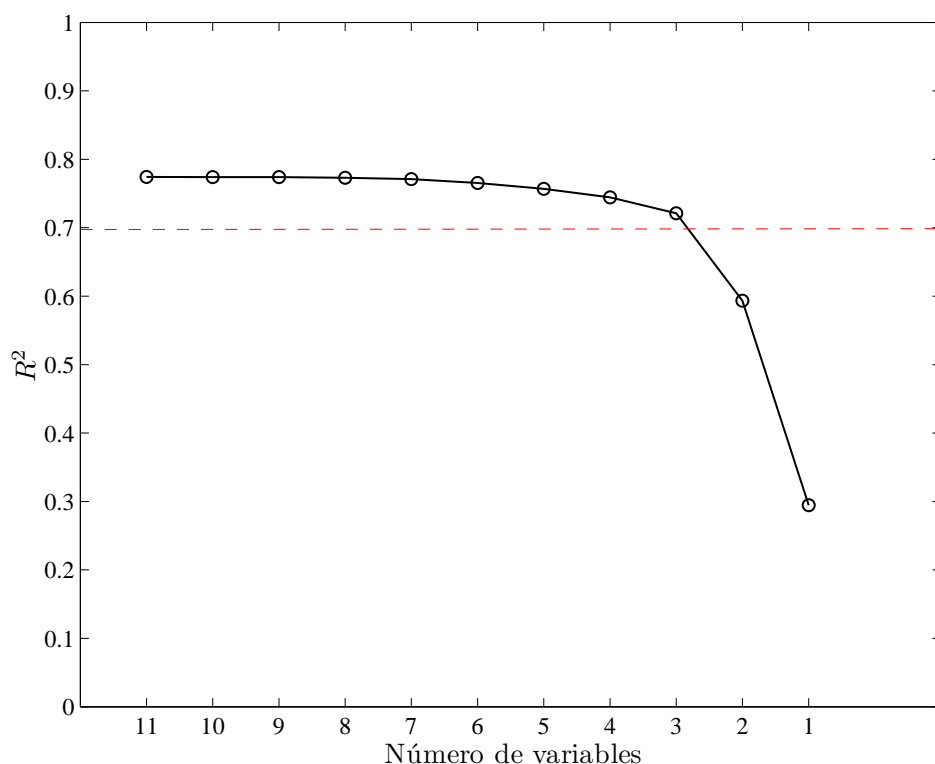


FIGURA 3.10: Variación del coeficiente de determinación durante el proceso de eliminación de variables.

descritas en la Tabla 3.9, que se eliminan progresivamente basándose en su  $p$ -valor. Como ejemplo, en la Figura 3.10 se muestra cómo varía el coeficiente de determinación para el modelo de QCI 8 conforme se eliminan variables. De la figura, se deduce que el modelo simplificado necesita al menos 3 variables para cumplir la condición  $R^2 > 0.7$ . La Tabla 3.10 muestra los parámetros resultantes para SM. Para el QCI 1, SM tiene solo cuatro variables independientes como un compromiso entre complejidad y precisión en la predicción. Se observa nuevamente cómo la predicción que SM hace de  $VoLTESatisfUsRatio$  es pobre ( $R^2=0.08$ ). Por el contrario, la estimación de  $TH_{QCI}^{(8)}$  se realiza con un  $R^2$  similar al de FM ( $R^2=0.73$ , comparado con 0.755 en FM). En SM, todas las variables independientes tienen su  $p$ -valor cercano a cero, lo que evidencia que es necesario considerarlas todas para realizar la predicción. Una inspección más detallada de los signos de los coeficientes de regresión mostrados en la Tabla 3.10 muestra que  $TH_{QCI}^{(8)}$  decrece con  $ActiveUE\_DL$  y  $HARQ\_fail\_ratio\_DL$ , y se incrementa con  $Avg\_CQI$  y  $BW$ .  $VoLTESatisfUsRatio$ , en cambio, decrece cuando sube  $ActiveUE\_DL$ , y se incrementa cuando crece  $Avg\_CQI$ ,  $PDCCH\_ack\_ratio$  y  $TrPerc_{QCI}^{(1)}$ .



<i>Estadísticos de regresión</i>				
<i>Coefficiente de determinación</i>	$R^{2(1)}=0.08$		$R^{2(8)}=0.73$	
<i>Análisis del modelo</i>				
	$\hat{\beta}_i^{(1)}$	$P^{(1)}$	$\hat{\beta}_i^{(8)}$	$P^{(8)}$
<i>Constant</i> ( $\beta_0$ )	-68.81	5e-8	-18.82	1.2e-51
<i>BW</i> [MHz]	–	–	1.5e-3	1e-236
<i>ActiveUE_DL</i>	-2.62	4.4e-3	-2.43	2e-107
<i>TrPerc<sub>QCI</sub><sup>(1)</sup></i> [%]	0.105	0.22	–	–
<i>Avg_CQI</i>	1.045	0.004	2.92	6e-273
<i>HARQ_fail_ratio_DL</i> [%]	–	–	-1.26	7e-67
<i>PDCCH_ack_ratio</i> [%]	1.57	7e-33	–	–

TABLA 3.10: Resultados para el modelo simplificado.

Las dos variables más relevantes para el SM de QCI 8 son el CQI promedio,  $Avg\_CQI$ , y el ancho de banda,  $BW$ . Con el fin de realzar la validez del modelo, en la Figura 3.11 se representa la dependencia de las medidas de  $TH_{QCI}^{(8)}$  con las medidas de  $Avg\_CQI$  y  $BW$ . En dicha figura se diferencian claramente las muestras según  $BW$ . Además, se observa una clara dependencia de  $TH_{QCI}^{(8)}$  con ambas variables, lo que evidencia la capacidad del modelo para identificar las variables relevantes.

### Estimación de la capacidad de celda

Una vez construido SM, se utiliza este modelo para estimar la capacidad de cada celda de la red. Como indicador de capacidad de celda, se selecciona la variable  $ActiveUE\_DL$ , que permanece en las dos ecuaciones de regresión que forman SM (es decir,  $p_{i_0}^{(j)} = ActiveUE\_DL^{(j)}$ ). Esta variable  $ActiveUE\_DL$  cuantifica el número medio de usuarios activos en DL por TTI en una celda, agregando todos los servicios.

A continuación se definen las restricciones de QoS de cada uno de los QCI. Siguiendo las recomendaciones del operador, se fijan los valores objetivo para los indicadores de QoS  $p_{QoS,target}^{(1)} \equiv VoLTESatisfUsRatio = 90\%$  y  $p_{QoS,target}^{(8)} \equiv TH_{QCI}^{(8)} = 5$  Mbps. Estos valores se utilizan después para estimar la capacidad de celda para cada QCI  $j$  y cada celda  $c$ ,  $\overline{ActiveUE\_DL}^{(j)}(c)$ , sustituyendo en (3.10) los valores de los coeficientes de regresión de SM presentados en la Tabla 3.10 y los valores medios de los PM en cada celda.

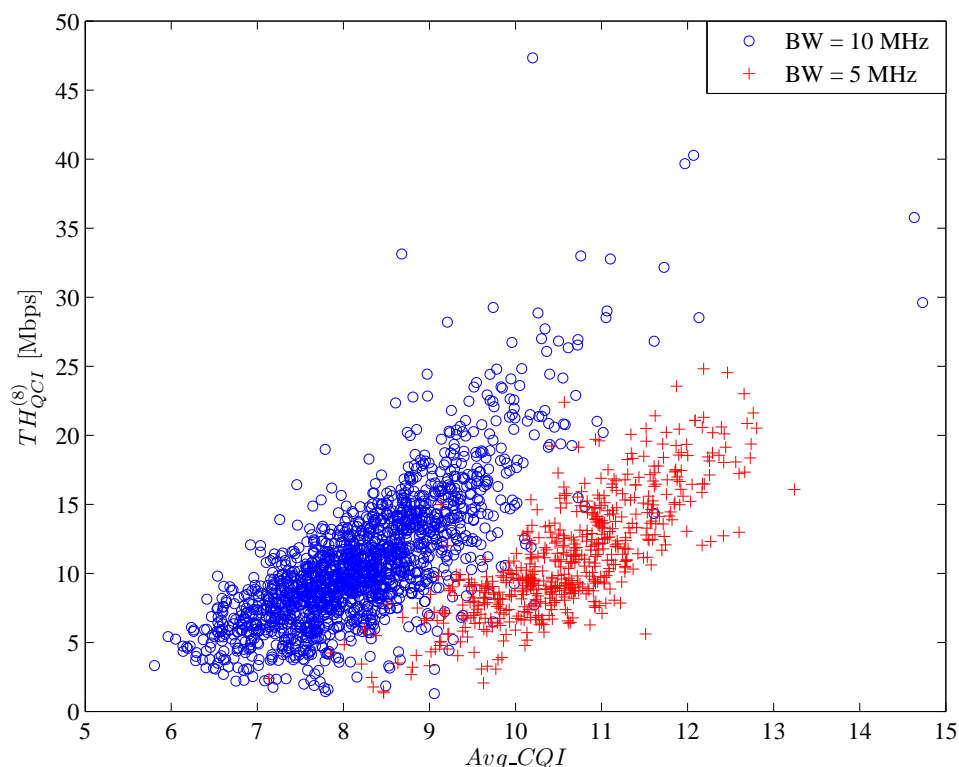


FIGURA 3.11:  $TH_{QCI}^{(8)}$  en función del CQI y el BW.

En la Figura 3.12 se compara la función de distribución de la capacidad de celda para el QCI 1 y 8,  $\overline{ActiveUE\_DL}^{(1)}(c)$  y  $\overline{ActiveUE\_DL}^{(8)}(c)$ . Se observa que, en general,  $\overline{ActiveUE\_DL}^{(1)}(c)$  es menor que  $\overline{ActiveUE\_DL}^{(8)}(c)$ . Por tanto, el criterio de QoS para el tráfico de QCI 1 es más restrictivo que el usado para el tráfico de QCI 8. Específicamente, la capacidad de celda media para asegurar el criterio de QoS para el QCI 8 en la red estudiada es de 3.02 usuarios activos en el enlace descendente por TTI, mientras que sólo es posible tener un total de 1.13 usuarios simultáneos en el enlace descendente por TTI para el QCI 1. Un nivel tan bajo es consistente con las estadísticas de rendimiento mostradas en la columna tercera de la Tabla 3.8, donde se observa que  $VoLTESatisfUsRatio = 91,77\%$  para 0.47 usuarios simultáneos en el canal descendente por TTI en media. Ese valor de  $VoLTESatisfUsRatio$  está próximo al valor impuesto como restricción de QoS para el QCI 1 (= 90%). De nuevo, se recuerda que las estimaciones de capacidad de celda para la clase de QCI 1 son poco robustas, por el poco tráfico de VoLTE en la red considerada. Repitiendo el análisis sobre otros juegos de datos provenientes de otras redes, se ha constatado que este mismo problema existe en todas las redes LTE actuales, donde VoLTE se encuentra todavía en su fase de

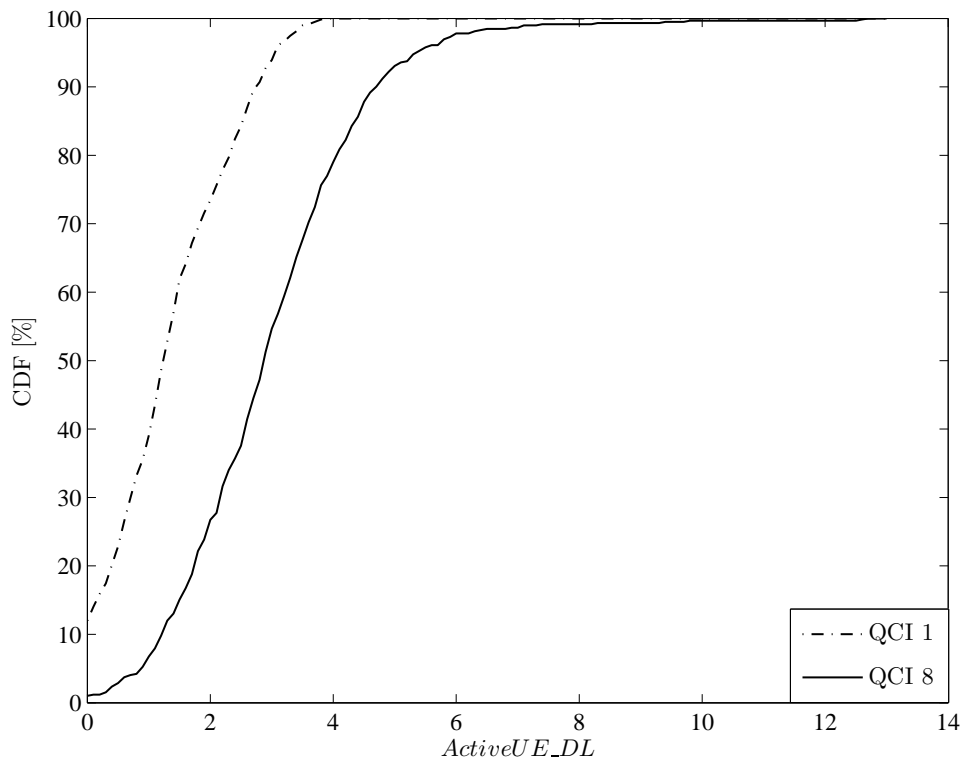


FIGURA 3.12: Función de distribución del número medio máximo de usuarios activos en el DL por celda.

despliegue inicial. Es previsible que la estimación de capacidad de este servicio mejore conforme crezca el tráfico de este servicio.

Se completa el análisis con una medida del tiempo de ejecución del método en un ordenador personal con 2.6GHz de frecuencia de reloj y 8GB de memoria RAM. El tiempo requerido para construir el modelo de regresión completo (FM) con las 2222 medidas de hora cargada es de 0.031 s. Por su parte, la construcción del modelo de regresión simplificado (SM) conlleva 0.468 s (2E-4 s por muestra de celda y hora). En cuanto a las estimas de capacidad, el tiempo de ejecución para las 656 celdas de la red es inferior a 0.1 s. Con esos tiempos de ejecución tan pequeños, es posible realizar estudios de capacidad en grandes áreas geográficas.

### 3.3.4. Conclusiones

En esta sección, se ha presentado una metodología de estimación de la capacidad de celda basada en medidas de rendimiento para redes LTE multiservicio. La

metodología propuesta permite estimar la capacidad de cada celda del sistema de forma independiente y bajo múltiples restricciones de QoS para cada servicio configurado en la red.

El núcleo de la metodología es la construcción de varias ecuaciones de regresión lineal multivariable con los parámetros de configuración y estadísticas de rendimiento recogidas por celda y hora en el sistema de gestión de una red real. A diferencia de los enfoques analíticos, la metodología estadística propuesta tiene una baja carga computacional, lo que la hace ideal para su inclusión en herramientas de planificación automática de redes LTE comerciales.

El análisis de datos de una red LTE real ha demostrado la gran dispersión de las condiciones radio, que justifica la necesidad de estimar la capacidad del sistema celda a celda. El análisis de regresión posterior ha demostrado que existe una fuerte correlación entre los indicadores de QoS de la red y el número de usuarios activos simultáneamente en el canal de datos descendente, el CQI medio, el ancho de banda del sistema y la tasa de asignaciones exitosas de recursos en el PDCCH.

Con los datos disponibles, los modelos de regresión aplicados han demostrado ser razonablemente precisos para servicios de transmisión de datos sobre TCP (QCI 8), pero poco fiables para el servicio de VoLTE (QCI 1). Con los modelos construidos, las estimas de capacidad sugieren que el número medio de usuarios activos por TTI en el canal de datos descendente que puede soportar una celda LTE varía entre 1 y 3, dependiendo de la restricción de calidad de servicio considerada. Se espera que, en el futuro cercano, la precisión de las estimas para el servicio de QCI 1 mejore con el incremento de tráfico de VoLTE en las redes LTE.

# 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. Finalmente, se presenta la lista de publicaciones resultantes del trabajo realizado.

### 4.1. Contribuciones

En esta Tesis Doctoral se han presentado diversos algoritmos de planificación automática diseñados para redes LTE. Todos los métodos descritos son lo suficientemente 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 y reducir el esfuerzo que suponen las tareas de dimensionado y planificación de parámetros de una red LTE.

Como se ha expuesto a lo largo del documento, el trabajo se ha dividido en dos grandes bloques, que son la planificación del control de potencia del enlace ascendente en LTE y la estimación de la capacidad de los canales de control y de datos de una celda LTE. La descripción de las principales contribuciones mantiene esta misma división.

### 4.1.1. Planificación automática del control de potencia en el enlace ascendente de LTE

En esta Tesis se ha abordado el problema de la planificación automática de parámetros en el algoritmo de control de potencia del PUSCH en el enlace ascendente estandarizado para LTE por el 3GPP. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

- 1) Como punto de partida, se ha presentado un detallado análisis de sensibilidad de los parámetros del control de potencia del canal de datos ascendente de LTE en lazo cerrado sobre un escenario regular. A partir de este análisis, se han diseñado dos algoritmos heurísticos de configuración automática de parámetros en el control de potencia del enlace ascendente. Un primer algoritmo, concebido para la fase de dimensionado de la red, ajusta los parámetros de potencia nominal,  $P_0$ , y carga del enlace ascendente,  $U_{UL}$ , celda a celda. Un segundo algoritmo, concebido para la fase despliegue de la red, ajusta los parámetros de potencia nominal,  $P_0$ , y factor de compensación de pérdidas,  $\alpha$ , para cada celda. Ambos algoritmos comparten la misma aproximación en la que la geometría irregular del escenario se regulariza para reducir la carga computacional. Gracias a la regularización de los escenarios, los métodos propuestos presentan un tiempo de ejecución mucho menor que la búsqueda exhaustiva de la mejor configuración uniforme con el simulador. De esta forma, los algoritmos propuestos son capaces de manejar escenarios irregulares y considerar el rendimiento del control de potencia en lazo cerrado, con un bajo coste computacional. Igualmente, la posibilidad de ejecutar el método para una sola celda asegura que el método sea escalable, no siendo necesaria la planificación de la red completa cada vez que se añade una celda en el escenario. Además, los métodos diseñados obtienen un compromiso entre capacidad y cobertura mejor que las configuraciones uniformes de parámetros, solución habitualmente empleada por los operadores. Este resultado demuestra la necesidad de configurar los parámetros del control de potencia de forma distinta en cada celda.
- 2) Para realizar las pruebas, se ha desarrollado un simulador estático de nivel de sistema para el enlace ascendente de LTE que puede ajustarse con datos de configuración y rendimiento de una red real. El simulador presentado es capaz de considerar el funcionamiento en lazo abierto y cerrado del control de potencia sin la complejidad de los simuladores dinámicos. Con esta herramienta,

se ha realizado un análisis de sensibilidad que permite identificar las configuraciones óptimas uniformes de parámetros en un escenario real. Con la misma herramienta, se ha evaluado el rendimiento de los algoritmos diseñados de planificación de parámetros del control de potencia en lazo abierto y cerrado.

#### 4.1.2. Estimación de la capacidad de celda en redes LTE

En esta Tesis también se ha abordado el problema de la estimación de capacidad en redes LTE. Por un lado, se ha estudiado la estimación de capacidad del canal de control descendente en LTE. Este canal es el principal cuello de botella de servicios sensibles al retardo con una gran carga de señalización, como el servicio de voz sobre LTE. Por otro lado, se ha estudiado la estimación de capacidad de celda en redes LTE multiservicio. Con ello, se pretende detectar con antelación la existencia de cuellos de botella en la interfaz radio que impidan cumplir las restricciones de calidad de servicio impuestas por el operador. Las principales contribuciones en esta parte se describen a continuación:

- 1) Se ha propuesto un modelo analítico del PDCCH, basado en teoría de colas, que permite estimar la ocupación del PDCCH en función de las condiciones de tráfico, propagación e interferencia propias de cada celda. El modelo propuesto considera el proceso de adaptación de enlace, que da lugar a múltiples flujos de entrada en función de la codificación de cada petición de servicio en el PDCCH. Para ajustar el modelo, se utilizan estadísticas de rendimiento disponibles en el sistema de gestión de red, como la intensidad de tráfico de señalización y la distribución de CQI. Con el modelo, es posible estimar tanto la tasa de ocupación media del PDCCH como cualquier percentil de la distribución de uso del PDCCH. Los resultados han mostrado que el modelo propuesto es capaz de reproducir de forma precisa las distribuciones de carga del PDCCH en las condiciones extremas consideradas en las simulaciones u otras condiciones observadas en determinadas celdas de la red real. Igualmente, el modelo es capaz de reproducir los niveles de carga del PDCCH a gran escala en redes de dos operadores distintos.
- 2) Durante las pruebas se han presentado estadísticas de rendimiento del PDCCH de dos redes reales con diferentes características. Las medidas de rendimiento han puesto de manifiesto que en LTE, a diferencia de lo que ocurre en otros

sistemas celulares, la señalización puede comprometer el buen funcionamiento del sistema.

- 3) También se ha propuesto una metodología novedosa para estimar la capacidad de cada celda en una red LTE con múltiples servicios, con diferentes restricciones de QoS cada uno, a partir de datos de configuración y rendimiento en el sistema de gestión de red. El método empírico propuesto realiza un análisis de regresión multivariable que permite considerar, de forma simple, las condiciones de tráfico, propagación e interferencia de cada celda de la red. Las estimas de capacidad obtenidas con el modelo son el punto de partida para el proceso de dimensionado de la red.
- 4) Se ha validado el método de estimación de la capacidad de celda propuesto, sobre un juego de datos real. Analizando el proceso de construcción del modelo ha sido posible identificar las variables más importantes que determinan la capacidad de celda en una red LTE real. Esta información es extremadamente útil si se desea construir un método de estimación aún más simple reduciendo el número de variables a considerar. Estos métodos simplificados facilitan la definición de una metodología de dimensionado que no requiera del uso de herramientas de cálculo sofisticadas. Al mismo tiempo, las ecuaciones de regresión construidas para la red concreta analizada pueden aplicarse a otras redes con similares funcionalidades. De esta manera, cualquier operador podría estimar la capacidad de su red sin necesidad de realizar el análisis de regresión.

## 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 automática del control de potencia en el enlace ascendente de LTE

Los algoritmos de planificación automática de parámetros del control de potencia propuestos en esta Tesis resuelven de forma independiente el problema de ajuste de  $P_0$  y  $U_{UL}$ , por un lado, y de  $P_0$  y  $\alpha$ , por otro lado. La mayor parte de



la bibliografía relacionada se dedica al estudio del control de potencia fraccional, para unos valores de  $U_{UL}$  determinados. Esto es, se estudia conjuntamente el problema de planificación de  $P_0$  y  $\alpha$  [34, 35, 38]. No obstante, en ninguno de los casos estudiados se tiene en cuenta una planificación conjunta de los parámetros de control de potencia y el control de carga. Una posible línea de trabajo futuro sería realizar una planificación de los parámetros  $P_0$ ,  $\alpha$  y  $U_{UL}$  de forma conjunta, para aprovechar al máximo las posibilidades de configuración del control de potencia y el control de carga. Para dicha tarea, debería realizarse un análisis de sensibilidad conjunto de todos los parámetros involucrados en el proceso de planificación. Con los resultados del análisis, habría que diseñar un algoritmo simple de ajuste de parámetros, con el fin de mantener el tiempo de ejecución tan bajo como sea posible.

Otra posible línea de ampliación del trabajo sería comparar los resultados obtenidos con el algoritmo de planificación para el funcionamiento en lazo abierto respecto al obtenido con lazo cerrado. En las actuales redes celulares, gran parte de la demanda de tráfico proviene de aplicaciones en las que se transmiten pequeñas ráfagas de datos durante conexiones cortas [77]. En estas condiciones, el funcionamiento en lazo abierto es tan importante como el funcionamiento en lazo cerrado.

Finalmente, el método de regularización de escenarios propuesto sólo se ha probado en la planificación de parámetros del control de potencia del enlace ascendente. Otra línea de extensión del trabajo futuro sería la extensión del método de regularización de escenarios a la planificación de otros parámetros de la interfaz radio que afecten al compromiso entre cobertura y capacidad, como son las potencias de transmisión de las estaciones base o los ángulos de orientación de las antenas [29]. La búsqueda del mejor ajuste inicial de estos parámetros en un escenario es un problema de optimización multivariable, que actualmente se resuelve con metaheurísticas de gran complejidad computacional (p.ej., Taguchi, algoritmos genéticos, búsqueda tabú, ...). Sería interesante comprobar si regularizando el escenario se pueden encontrar soluciones de calidad parecida a las obtenidas con los métodos clásicos.

### 4.2.2. Estimación de la capacidad de celda en redes LTE

La metodología propuesta basada en el análisis de regresión se ha validado con un juego de datos extraídos de una red que solo incluye dos servicios mayoritarios. Una línea natural de extensión del trabajo es repetir el análisis en otras redes que incluyan más clases de servicio cuando estén disponibles. En este sentido, se puede decir que la metodología propuesta se ha probado en otras redes con diferenciación entre distintas clases de servicio de datos de propósito general (p.ej., para diferenciar usuarios de prepago y contrato, *roaming*, ...) con idénticas conclusiones. Así, se intuye que el lanzamiento de servicios con restricciones de tiempo real, como VoLTE, videollamada o descarga de vídeo, podría modificar las conclusiones del análisis.

Otra línea de extensión es la búsqueda de nuevos parámetros e indicadores de red que sirvan para mejorar las estimas realizadas con el modelo de regresión. Se prevé que uno de los principales factores que determina la capacidad de celda es el planificador dinámico de recursos (*scheduler*). En las redes actuales, el algoritmo de planificación de recursos se establece por defecto, y solo en celdas donde existen problemas de congestión se modifica dicha selección. Con la aparición de nuevos servicios, y el aumento de la diversidad de la mezcla de tráfico en las celdas del sistema, se intuye que los parámetros del planificador pueden afectar de manera importante en la capacidad de celda.

## 4.3. Lista de Publicaciones

A continuación se enumera la lista de publicaciones resultantes del trabajo realizado en esta Tesis.

### Artículos

- [I] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora, C. Úbeda. “A computationally efficient method for self-planning uplink power control parameters in LTE”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Marzo 2015:80.

- [II] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, J.J. Sánchez-Sánchez. “Estimating Cell Capacity From Network Measurements in a Multi-Service LTE System”, *IEEE Communications Letters*, 2015, **19**, 431-434.

### Conferencias y reuniones científicas

- [III] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora, C. Úbeda. “Self-Planning of PUSCH parameters on LTE networks”, TD(13)06063 *COST IC1004 5<sup>th</sup>-meeting*, Málaga, 6-8 Febrero 2013.
- [IV] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, C. Úbeda. “Estimadores de rendimiento de red de bajo coste computacional en escenarios irregulares LTE”, Actas de XXVIII Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2013), Santiago de Compostela (España), Septiembre 2013.
- [V] J.A. Fernández-Segovia, I. de-la-Bandera, A.J. García-Pedrajas, M. Toril, S. Luna-Ramírez. “Simulador estático de nivel de sistema del canal ascendente de datos en redes LTE”, Actas de XXIX Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2014), Valencia (España), Septiembre 2014.
- [VI] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, C. Úbeda. “Computationally-efficient estimation of throughput indicators in heterogeneous LTE networks”, *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC*, Glasgow, Mayo 2015.

### Solicitudes de Patente

- [VII] J.A. Fernández-Segovia, S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora, C. Úbeda. “Method and network node for obtaining nominal power and pathloss compensation factor of a power control process” Solicitante: Ericsson. European Patent Application PCT/SE2014/051042, Septiembre 2014.

La lista de contribuciones anterior puede relacionarse con el contenido de la memoria de forma resumida del siguiente modo. [I, III, IV, VI, VII] son trabajos que contienen el trabajo descrito en el Capítulo 2, mientras que [II] presenta las investigaciones descritas en el en el Capítulo 3. Por último, [V] presenta la herramienta de simulación descrita en el Apéndice A.

Más detalladamente, en [III], se esboza por primera vez el algoritmo de configuración automática de parámetros de control de potencia en LTE y la estrategia de regularización de escenarios. Este trabajo se amplía y presenta en [I]. Por su parte, con una estrategia de regularización similar, pero un objetivo de diferente en cuanto a parámetros optimizados, el algoritmo de configuración automática de parámetros de potencia nominal ( $P_0$ ) y compensación de pérdidas ( $\alpha$ ) está contenido en [VII]. Aprovechando el trabajo del Capítulo 2, en [IV, VI] se presentan una serie de estimadores de tasa de datos de usuario para LTE que aprovechan la estrategia de regularización descrita en el Capítulo 2. Estos estimadores pueden utilizarse para evaluar la calidad de las soluciones de parámetros irregulares construidas con una herramienta de planificación sin necesidad de un simulador de nivel de sistema. En esta línea, en [V] se presenta el simulador estático de nivel de sistema del canal ascendente de datos de LTE que se describe en el Apéndice A. Dicho simulador se usa para verificar los algoritmos que se presentan en el Capítulo 2. Por otro lado, en [II] se presenta una metodología para la estimación de capacidad de celda en redes LTE multiservicio basada en medidas reales.

Todas estas contribuciones se han desarrollado en el marco de un contrato de colaboración 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. Además, con [III] se ha participado en la acción COST IC1004 (*Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments*).

# Apéndice A

## Herramienta de simulación para el canal ascendente de LTE

En este apéndice se presenta un simulador estático de nivel de sistema para el canal de datos de usuario ascendente (PUSCH) de LTE, desarrollado en Matlab. Esta herramienta ha sido concebida para la evaluación del rendimiento de algoritmos automáticos de planificación y optimización para el PUSCH de LTE. Primero se introducen las características básicas del enlace ascendente de LTE. Después se detalla la funcionalidad del simulador y, por último, se describe el procedimiento de validación de la herramienta.

### A.1. Características del canal ascendente en LTE

El esquema básico de modulación seleccionado para LTE es OFDM [78]. La ventaja de OFDM reside en su robustez en presencia de desvanecimientos de señal severos por propagación multicamino. La multiplexación en DL se realiza por acceso OFDM (*OFDM Access*, OFDMA), mientras que el esquema de transmisión seleccionado para el UL es OFDMA de portadora única (*Single Carrier-OFDMA*, SC-OFDMA). La principal ventaja de SC-OFDMA frente a OFDMA es su bajo factor de cresta (*Peak-to-Average Power Ratio*, PAPR), que permite mejorar la eficiencia del amplificador del UE, y, con ello, reducir el consumo de batería.

La Figura A.1 muestra la estructura típica de asignación de recursos radio OFDM en LTE. En la figura, se representa la división del ancho de banda del

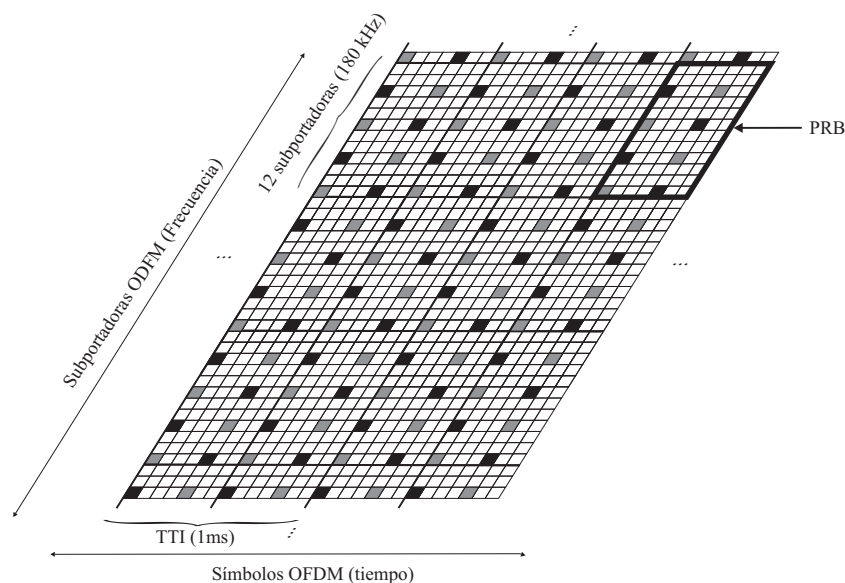


FIGURA A.1: Estructura de asignación de recursos radio en LTE.

sistema en subportadoras de 15 kHz, y del tiempo en símbolos OFDM. Asimismo, se refleja el intervalo mínimo de transmisión (TTI), cuya duración es 1 ms, y la unidad mínima de asignación de recursos en frecuencia (PRB), consistente en 12 subportadoras (180 kHz).

La asignación de recursos en el UL se lleva a cabo en la estación base dependiendo de la calidad del enlace radio experimentada por el usuario en cada momento. Así, se asigna un número de PRB a un UE de acuerdo a la tasa de transmisión requerida y la SINR estimada. Dicha asignación puede modificarse para cada usuario en cada TTI, si ésta se realiza de forma totalmente dinámica. Para reducir la carga de computación del proceso de asignación, se pueden asignar recursos de forma persistente o semipersistente (por ejemplo, cada 10 TTI).

Los recursos radio se asignan de forma diferente dependiendo del tipo de información que transportan. En el UL de LTE se definen tres canales físicos: el PRACH, el PUSCH y el PUCCH. En particular, el PUSCH se utiliza para transmitir datos de usuario e información de control para los usuarios que tienen una conexión activa en UL.

En el PUSCH, los datos se transmiten usando los esquemas de modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM, dependiendo de la calidad del canal radio experimentada por el usuario [13]. El esquema de modulación y codificación utilizado en cada momento se selecciona por medio del proceso de adaptación del enlace (LA) en la estación base. Igualmente, en el PUSCH, el terminal móvil aplica el algoritmo



FIGURA A.2: Diagrama de flujo del simulador del enlace ascendente de LTE.

de control de potencia fraccional descrito en [13]. Dicho algoritmo utiliza estimaciones de las pérdidas de propagación radio en el UL para modificar la potencia de transmisión de cada usuario.

## A.2. Funcionalidad del simulador

En esta sección se describe la funcionalidad del simulador, cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura A.2.

En un primer paso se configuran los parámetros de simulación, que determinan el escenario a simular (p.ej., la localización de las estaciones base, los ángulos de orientación de las antenas, ...), b) las características de la red (p.ej., ancho de banda del sistema, intervalo de transmisión, ...) y c) las características de los terminales (parámetros del algoritmo de ULPC,...). La Tabla A.1 resume los principales parámetros de configuración del sistema, así como sus valores por defecto.

En los siguientes pasos se estima el rendimiento de la red sin necesidad de realizar varias iteraciones. Es importante resaltar que el simulador está concebido para validar algoritmos de planificación. Por ello, en su diseño se trata de reducir al máximo la carga de computación de las simulaciones. En la mayoría de simuladores descritos en la bibliografía (p.ej., [79, 80]) se generan múltiples realizaciones del estado del sistema creando usuarios en posiciones aleatorias según una distribución espacial de tráfico. Para conseguir estimas robustas del rendimiento de la red se requiere generar y después agregar muchas (habitualmente, miles) de

Parámetro	Valor
Número de celdas	165 eNBs, 55 emplazamientos
Dirección de enlace	UL
Frecuencia de portadora	734 MHz
Ancho de banda	10 MHz, 50PRB
Reuso de frecuencias	1
Modelo de propagación	COST-231 (A.1)
Potencia DL de eNB	46 dBm
Directividad	trisectorial
<i>Tilt</i> de antena de eNB	5°
Ancho de haz de antena de eNB	65°
Ganancia de antena de eNB	15 dB
Potencia de transmisión del UE	23 dBm
Densidad espectral de potencia de ruido	-174 dBm/Hz
Modelo de tráfico	<i>Full buffer</i>
Parámetros ULPC	$P_0 = -110$ dBm, $\alpha = 1$
Generación de tráfico	Distribución uniforme

TABLA A.1: Parámetros de simulación.

estas realizaciones, lo que aumenta el tiempo de simulación. En el simulador desarrollado en esta Tesis se evita la generación de múltiples realizaciones del sistema (y, con ello, la ejecución de múltiples iteraciones del simulador) manejando todas las ubicaciones de manera simultánea por medio de una función de probabilidad. Para ello, se divide el escenario en una rejilla uniforme de puntos que representan las posibles ubicaciones de los usuarios. Cada ubicación tiene una probabilidad de existir de acuerdo con una distribución espacial de tráfico. En estas ubicaciones, se calculan todos los parámetros de rendimiento del sistema en una sola iteración.

Para la estima del rendimiento, se calculan primero las pérdidas de propagación (*Propagation Losses*, PL) en el escenario. En este proceso, se asigna un valor de PL entre cada posible localización de un UE y cada eNB en el escenario. Esta información se organiza en una matriz de valores de PL, donde el índice  $z$  identifica al eNB y los índices  $x$  e  $y$  establecen la posición de UE. Después se realiza la identificación de celdas adyacentes. Una vez se ha calculado la matriz de PL, se debe definir una lista de celdas adyacentes para cada celda. Estas celdas adyacentes se ordenan por valor medio de PL (es decir, distancia en términos eléctricos entre celdas). Los siguientes pasos realizan los cálculos de SINR y la ejecución de funciones RRM, respectivamente. Por último, se calculan los principales indicadores de rendimiento y se presentan resultados de forma ordenada. Los siguientes apartados describen con mayor detalle estos procesos.



### A.2.1. Nivel físico

Para facilitar el tratamiento matemático del problema se asume que: a) la reutilización de frecuencias es 1 (es decir, todas las celdas usan todo el ancho de banda del sistema), b) la asignación de PRB se hace por celda (es decir, no hay coordinación entre celdas), y c) a la hora de estimar la asignación de recursos hay un usuario activo por celda en cada momento, que tiene infinitos datos que transmitir (modelo de servicio *full buffer*). La última asunción implica que todo el ancho de banda de UL puede asignarse por completo a ese único usuario, y, por tanto, se puede alcanzar la tasa de datos máxima de usuario.

#### Generación de tráfico

La generación de tráfico se configura a través de la definición del área global de servicio, la ocupación media de PRB por celda y la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda.

El área global de servicio considera la topografía del terreno definiendo zonas que nunca van a ser ocupadas por ningún usuario (p. ej., mar, lago, ...). Para ello, se construye un polígono que define el área global de servicio a partir de datos geográficos del escenario. La Figura A.3 muestra un ejemplo de cómo las zonas de costa pueden delimitarse por esta funcionalidad. Por eficiencia de computación, la herramienta excluye de los cálculos de propagación las zonas no utilizadas.

La probabilidad de cada punto del escenario viene determinada por la ocupación media de PRB por celda y la distribución espacial de usuarios dentro de cada celda. En este trabajo se asume una distribución regular de usuarios dentro de cada celda, mientras que la tasa de ocupación media de PRB puede prefijarse como un parámetro o extraerse de medidas de la red real.

#### Modelo de propagación radio

El simulador usa la extensión COST-231 del modelo Okumura-Hata [81], en el que las pérdidas de trayecto (en dB) vienen determinadas por la ecuación

$$a = 69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b) + [44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_b)] \cdot \log_{10}(d), \quad (\text{A.1})$$

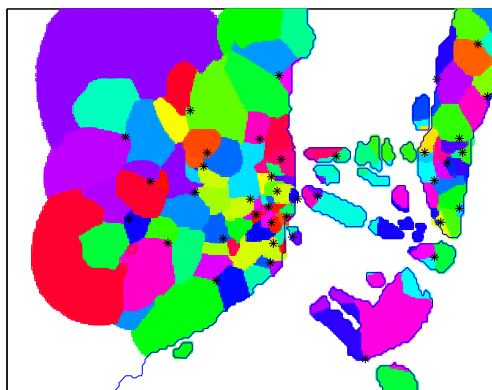


FIGURA A.3: Escenario real con límites costeros determinados por el simulador.

donde  $f_c$  es la frecuencia central del ancho de banda de transmisión (o frecuencia de portadora) del enlace ascendente,  $h_b$  es la altura de la estación base y  $d$  es la distancia en km. También se incluyen las funciones necesarias para ajustar las constantes del modelo con medidas de nivel recibido de señales piloto recopiladas por los usuarios de una red real.

A estas pérdidas de trayecto se suman las pérdidas por desvanecimiento lento, que toman un valor aleatorio siguiendo una distribución *lognormal* de media nula y desviación estándar 8 dB.

El modelo de antena incluye un diagrama de captación en el plano horizontal y vertical [41]. La ganancia relativa de la antena a cada punto del escenario se calcula teniendo en cuenta las alturas de la estación base y la estación móvil y la posición relativa entre ambas.

Con estos términos, se calcula una matriz de propagación, que refleja las PL de cada eNB a cada punto del escenario, agregando la pérdida de trayecto, la directividad de antena y el desvanecimiento lento en cada punto del escenario.

### A.2.2. Nivel de enlace

A continuación se describen los modelos del algoritmo de control de potencia y el proceso de adaptación del enlace incluidos en el simulador. Posteriormente, se describe el proceso de asignación de recursos, que condiciona los cálculos de la calidad de conexión realizados en el simulador.

## Adaptación de enlace (*Link Adaptation, LA*)

En este apartado se describen las características modeladas de la capa de LA. Fundamentalmente se hablará del algoritmo de control de potencia en UL y de la forma en que se trata la modulación adaptativa en el UL de LTE.

- Algoritmo de control de potencia en PUSCH

El esquema de control de potencia en el PUSCH de LTE es resultado de la combinación de 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 del canal, mientras que el CLPC se adapta a cambios en las condiciones de interferencia o errores de estimación de PL. En el algoritmo estandarizado por el 3GPP para el PUSCH [13], la potencia transmitida por el UE en dBm viene dada por:

$$P_{TX} = \min \left\{ P_{tx_{\max}}, \underbrace{P_0 + \alpha \cdot PL}_{\text{punto básico de operación}} + \underbrace{\Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})}_{\text{término dinámico}} + \underbrace{10 \cdot \log_{10} M_{PUSCH}}_{\text{factor ancho de banda}} \right\}, \quad (\text{A.2})$$

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,  $PL$  se refiere a las pérdidas por propagación,  $M_{PUSCH}$  es el número de PRB 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 (o comandos TPC) enviados por el eNB.

La ecuación (A.2) puede dividirse en tres partes: el punto de operación básico en lazo abierto, una compensación dinámica controlada por la operación en lazo cerrado y un factor de corrección por ancho de banda utilizado. El término de lazo abierto consiste de un nivel semiestático determinado por el parámetro  $P_0$  (conocido como potencia nominal), definiendo así el umbral de potencia media de señal recibida de todos los UE en una celda, y un término de compensación por pérdidas de propagación, controlado por el factor de compensación por pérdidas de propagación,  $\alpha$ . En este trabajo, se considera que la potencia nominal,  $P_0$ , es igual para todos los UE servidos por el mismo eNB.

- Modulación y codificación adaptativa

El proceso de adaptación del enlace que lleva a cabo la estación base selecciona el esquema de modulación y codificación que mejor se adapta a las condiciones instantáneas del canal. Para ello, el eNB debe estimar la SINR del enlace ascendente. En este trabajo, se modela el esquema de modulación adaptativa mediante la fórmula truncada de *Shannon* [40], al igual que en la Sección 2.2.2. Así, la tasa de datos máxima alcanzable por PRB se obtiene directamente de los valores de SINR calculada para cada usuario (posición) según

$$TH_{perPRB}(k) = \begin{cases} 0 & SINR(k) < SINR_{\min}, \\ \beta \cdot \log_2(1 + SINR(k)) & SINR_{\min} \leq SINR(k) \leq SINR_{\max}, \\ TH_{perPRB_{\max}} & SINR_{\max} < SINR(k), \end{cases} \quad (A.3)$$

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 esta Tesis se han ajustado de forma empírica los valores de la ecuación tal que  $TH_{perPRB_{\max}} = 514$  kbps,  $SINR_{\max} = 14$  dB,  $SINR_{\min} = -9$  dB y  $\beta=0.6$ .

Para calcular la tasa de datos alcanzada por un usuario  $k$ , basta multiplicar 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

$$TH_{us}(k) = TH_{perPRB}(k) \cdot M(k) \quad . \quad (A.4)$$

## Esquema de asignación de PRB

El proceso de asignación se realiza mediante un planificador dinámico de recursos en el eNB, que asigna recursos a los usuarios de forma que se maximice el rendimiento del sistema en términos de QoS y tasa de datos. Cada fabricante diseña e implementa su propio planificador de recursos. En la herramienta de simulación se implementa un planificador simplificado basado en dos etapas. En una primera etapa se realiza una asignación preliminar de PRB, denominada *esquema de asignación inicial*, basándose en el algoritmo de control de potencia en UL en lazo abierto. En este primer paso se tiene una estimación inicial del número de

PRB usados por cada usuario. A partir de esta estimación se puede hacer una predicción de los niveles medios de interferencia UL. En una segunda etapa, otro esquema, denominado *esquema de asignación refinado*, modela el funcionamiento de planificador de recursos en lazo cerrado, calculando la asignación final de PRB para cada usuario de forma que se garantice una SINR objetivo basándose en la estimación de interferencia realizada con el *esquema de asignación inicial*.

- *Esquema de asignación inicial* - Estimación de interferencia

Este primer esquema teórico de asignación de PRB se basa en el control de potencia UL en lazo abierto. El número de usuarios asignados a un usuario  $k$ ,  $M(k)$ , es el número máximo de PRB 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

$$M(k) = \text{máx} \left\{ M_{\text{mín}}, \text{mín} \left( 10^{(P_{TX_{\text{máx}} - \alpha \cdot PL(k) - P_0(k)})/10}, M_{\text{máx}} \right) \right\}, \quad (\text{A.5})$$

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 [3]. El valor  $M(k)$  obtenido por (A.5) se usa para estimar la potencia transmitida por cada usuario en (A.2).

Como en la mayoría de simuladores utilizados en tareas de planificación, se trabaja con niveles medios de interferencia. Así, la interferencia media en unidades naturales en el UL de la celda  $i$  se calcula como

$$I_{UL}(i) = \sum_{\forall j \in N(i)} \left( U_{UL}(j) \cdot \frac{1}{N_u(j)} \cdot \sum_{\forall k \in A(j)} \frac{P_{TX}(k)}{PL(k, j)} \right), \quad (\text{A.6})$$

donde  $N(i)$  es el grupo de celdas adyacentes a la celda bajo estudio  $i$ ,  $U_{UL}(j)$  es el factor de ocupación de PRB en la celda  $j$ ,  $N_u(j)$  es el número de usuarios en el área de servicio de  $j$ ,  $A(j)$  es el conjunto de puntos (posiciones de usuario) de la celda  $j$ ,  $P_{TX}(k)$  es la potencia de transmisión del punto (usuario)  $k$  y  $PL(k, i)$  son las pérdidas propagación del punto  $k$  a la estación base  $i$ .

- Esquema de asignación refinado - Estimación de SINR

Basándose en los valores de interferencia estimados, un segundo esquema de asignación de PRB distribuye los recursos tal como se realizaría en lazo cerrado. Así, un usuario obtiene el máximo número posible de PRB siempre y cuando sea capaz de garantizar un nivel de SINR mínimo. El cálculo se expresaría como

$$M(k) = \max \left\{ M_{\min}, \min \left( 10^{(P_{TX_{\max}} - \alpha \cdot PL(k) - I_{UL}(S(k)) - SINR_{th})/10}, M_{\max} \right) \right\}, \quad (\text{A.7})$$

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 [3]). En (A.7) el número de PRB asignado al usuario se reduce para incrementar la densidad espectral de potencia si el umbral de SINR mínimo no se satisface (ya sea por un bajo nivel de señal recibida o por un alto nivel de interferencia).

### A.2.3. Nivel de red

La capa de nivel de red implementa diferentes procedimientos de gestión de recursos radio que garantizan la continuidad de la conexión cuando el usuario se desplaza, como son el traspaso, el control de admisión y el control de congestión. Dada la naturaleza estática del simulador, en este apartado solo se describen los dos procedimientos implementados a nivel de red: el control de admisión (AC) y la detección automática de vecinas (*Automatic Neighbor Relation*, ANR).

#### Control de admisión

El primer paso para iniciar una conexión por parte de un UE es decidir cuál es la celda servidora del usuario. En la herramienta de simulación, esta decisión se realiza exclusivamente en función del nivel de potencia de señal de referencia recibido (*Reference Signal Received Power*, RSRP). Para cada usuario, la conexión se realiza con aquella celda de la que recibe mayor nivel de RSRP. Aquellos usuarios que reciben un valor de RSRP máximo por debajo del umbral establecido para el traspaso a otra tecnología (*inter-Radio Access Technology*, *iRAT*, *handover threshold*), no se conectan a ninguna celda LTE. La celda servidora seleccionada debe, por tanto, cumplir que

$$RSRP(i) \geq RSRP_{th}, \quad (\text{A.8})$$

donde  $RSRP(i)$  es el nivel de RSRP de la celda  $i$  recibido en el UE y  $RSRP_{th}$  denota el umbral de iRAT. Dicho umbral de iRAT se suele definir por parte del operador a nivel de un conjunto de celdas.

### Definición de vecinas

En una red LTE real, la función ANR [78] libera al operador de la costosa tarea de definir manualmente las relaciones entre celdas adyacentes. En el simulador, se ha incluido una función ANR básica que define de forma automática la lista de celdas vecinas de cada celda del escenario. Esta funcionalidad se basa en el cálculo de la pérdida de propagación media desde cualquier celda vecina  $j$  a la celda bajo estudio  $i$ , expresada 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 las pérdidas de propagación del punto  $k$  a la estación base  $j$ ,  $A(j)$  son los puntos (usuarios) servidos por la celda  $j$ . Una vez calculado el valor de  $\overline{PL}(j, i)$  para todas las celdas  $j \neq i$ , se seleccionan como vecinas de  $i$  las  $N_{r_{sim}}$  primeras celdas adyacentes  $j$  con menor valor de  $\overline{PL}(j, i)$ . En este trabajo,  $N_{r_{sim}} = 20$ .

### Indicadores de Rendimiento

Los indicadores utilizados en este trabajo para evaluar las distintas configuraciones de parámetros se describen a continuación.

- Histograma de RSRP

Aunque el RSRP es una medida de DL, los valores de RSRP se utilizan en la función de AC para determinar las áreas de dominancia (o servicio) de cada celda. Dichas áreas de dominancia se tienen en cuenta en la definición de los usuarios servidos por cada celda y los usuarios interferentes, y, por ello, condicionan los resultados de los experimentos.

Además, los histogramas de frecuencia relativa de RSRP,  $f_{RSRP}$ , sirven para mostrar las condiciones de propagación de cada una de las celdas. Esta información se puede utilizar para ajustar las constantes del modelo de propagación con medidas reales de RSRP, como se explica más adelante.

- Estadísticas de tasa de transferencia de datos

El indicador más usado para medir el rendimiento de un sistema de comunicaciones celulares es la tasa de datos de usuario. En el simulador se definen dos indicadores de tasa de datos: a) la tasa de datos media de usuario,  $TH_{avg}$ , calculada como la media de tasa de datos de usuario en todos los puntos de una celda, que se usa como medida de capacidad, y b) la tasa de datos de usuario de borde de celda,  $TH_{ce}$ , definida como el percentil del 5% de la función de probabilidad de la tasa de datos de usuario en la celda, como medida de cobertura de la celda. Expresados matemáticamente,

$$TH_{avg}(i) = U_{UL}(i) \cdot \frac{\sum TH_{us}(k, i)}{N_u(i)} , \quad (A.10)$$

$$TH_{ce}(i) = P_{TH_{us}, 5\%}(i) , \quad (A.11)$$

donde  $U_{UL}(i)$  es la carga de la celda,  $TH_{us}(k, i)$  es la tasa de datos obtenida por el usuario  $k$  servido por la celda  $i$ ,  $N_u(i)$  es el número de usuarios de la celda  $i$  y  $P_{TH_{us}, 5\%}(i)$  es el percentil del 5% de la tasa de transferencia de datos en la celda  $i$ .

### A.3. Análisis de sensibilidad de parámetros del ULPC

Como ejemplo práctico de aplicación del simulador, se presenta a continuación un análisis de sensibilidad de los parámetros del control de potencia en el PUSCH en un escenario ajustado con datos de una red real. La Tabla A.2 presenta la configuración de parámetros tomada de la red real.

En el escenario considerado se dispone de estadísticas de RSRP que permiten ajustar las constantes del modelo de propagación. El modelo de propagación ajustable se describe según la ecuación

$$a = K_1 - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b) + [K_2 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_b)] \cdot \log_{10}(d) , \quad (A.12)$$



Parámetro	Valor
Número de celdas	165 eNBs, 55 emplazamientos
Dirección de enlace	UL
Frecuencia de portadora	734 MHz
Ancho de banda	10 MHz, 50 PRB
Reuso de frecuencias	1
Modelo de propagación	COST-231, ajustado con estadísticas de RSRP
Potencia DL de eNB	Realistas, de 44.4 dBm a 47.4 dBm
Directividad	trisectorial
<i>Tilt</i> de antena de eNB	Realista, de 0° a 14°
Ancho de haz de antena de eNB	65°
Ganancia de antena de eNB	15 dB
Potencia de transmisión del UE	23 dBm
Densidad espectral de potencia de ruido	-174 dBm/Hz
Modelo de tráfico	<i>Full buffer</i>
Parámetros ULPC	$P_0 = -110$ dBm, $\alpha = 1$ (por defecto)
Generación de tráfico	Distribución uniforme dentro de celda
Tasa de ocupación de PRB por celda	Realista, de 5% a 17.43%

TABLA A.2: Parámetros de simulación.

donde  $K_1$  y  $K_2$  son las variables de ajuste, compartidas por todas las celdas del escenario. El algoritmo de ajuste busca minimizar el error cuadrático medio entre los valores del histograma de frecuencia relativa de RSRP del simulador,  $f_{RSRP,sim}$ , y los obtenidos de la red real,  $f_{RSRP,real}$ . Para ello, para generar el histograma del simulador se utilizan los mismos límites de los intervalos que en la red real. Tras el proceso de ajuste, los valores que resultan son  $K_1=152.72$  y  $K_2 =64.38$ . La Figura muestra el histograma de frecuencia relativa y la función de distribución de los valores de RSRP obtenidos de la red real (línea continua) y los obtenidos con el simulador (línea discontinua). Una vez ajustado el modelo de propagación, se realiza un análisis similar al del Capítulo 2, donde se evalúa el impacto de los cambios de  $P_0$  y  $\alpha$  en el rendimiento del sistema. Como principal novedad, aquí se muestra también el impacto sobre el nivel de interferencia media,  $I_{UL}$ , que no se mostró entonces por simplicidad. Todos los indicadores de rendimiento que se muestran a continuación corresponden a los valores promedio obtenidos en todas las celdas del escenario.

### Experimento 1: Sensibilidad a cambios de $P_0$

La Figura A.5 muestra en el eje de ordenadas principal el indicador  $\overline{TH_{ce}}$  (medida de cobertura) frente a  $\overline{TH_{avg}}$  (medida de capacidad) cuando  $P_0$  varía desde

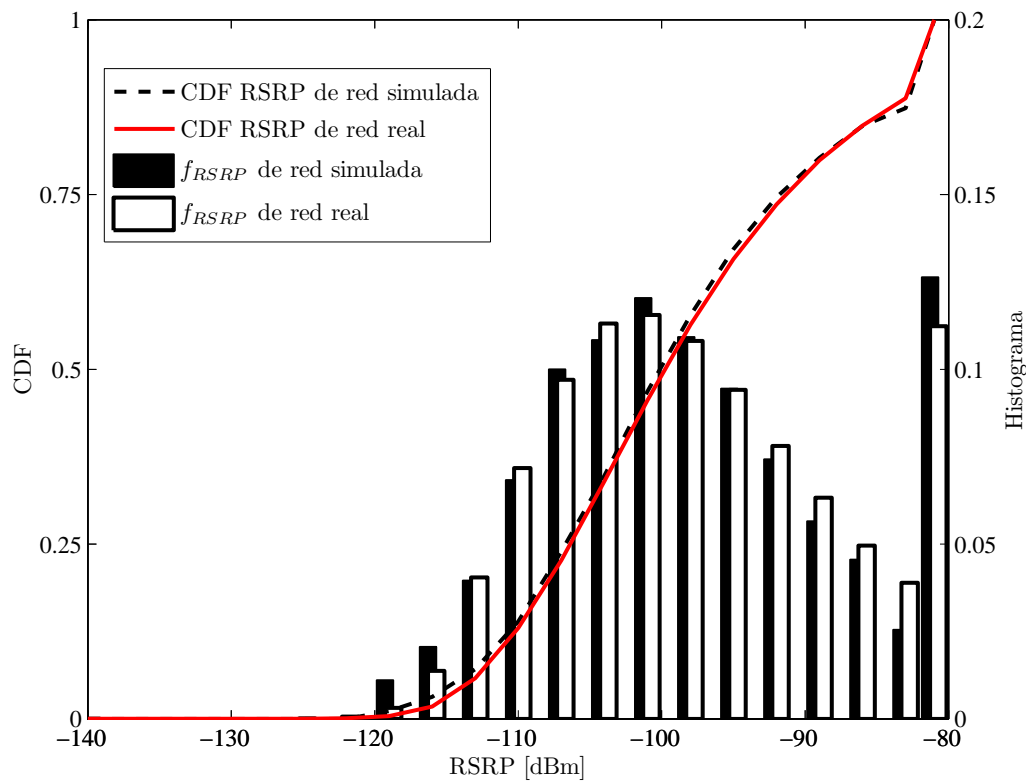


FIGURA A.4: Comparación del histograma de RSRP del simulador y la red real. El pequeño desplazamiento entre las funciones de distribución pone de manifiesto el buen ajuste del modelo.

-80 dBm hasta -125 dBm en pasos de 1 dB, para un valor fijo de  $\alpha = 1$  (compensación total de pérdidas de propagación). En el eje de ordenadas secundario, se representa el indicador  $\overline{I_{UL}}$  frente a  $\overline{TH_{ce}}$  para los mismos valores de  $P_0$  y  $\alpha$ . El resto de parámetros de configuración del simulador son los de la Tabla A.2.

En la figura, se identifican tres zonas claramente diferenciadas. En la Zona 1, para la línea sólida, ambos indicadores  $\overline{TH_{avg}}$  y  $\overline{TH_{ce}}$  crecen mientras decrece el valor de  $P_0$ , hasta llegar a un máximo de  $\overline{TH_{avg}}$  (donde  $P_0$  es aproximadamente de -100 dBm). Esta primera zona se caracteriza por una reducción en la interferencia debida a la reducción de  $P_0$ . La potencia transmitida por los usuarios se reduce, pero el valor de  $P_0$  es suficientemente alto para obtener valores de tasa de datos de usuario altos. A continuación, la Zona 2 se caracteriza por un mantenimiento de la reducción de interferencia a la que se suma una degradación en los niveles de señal, por el decremento de  $P_0$ . En esta zona, la cobertura ( $\overline{TH_{ce}}$ ) se sigue mejorando, pero a costa de empeorar la capacidad ( $\overline{TH_{avg}}$ ). Finalmente, en la Zona 3, los decrementos continuados de  $P_0$  no producen reducción en la interferencia, pero sí

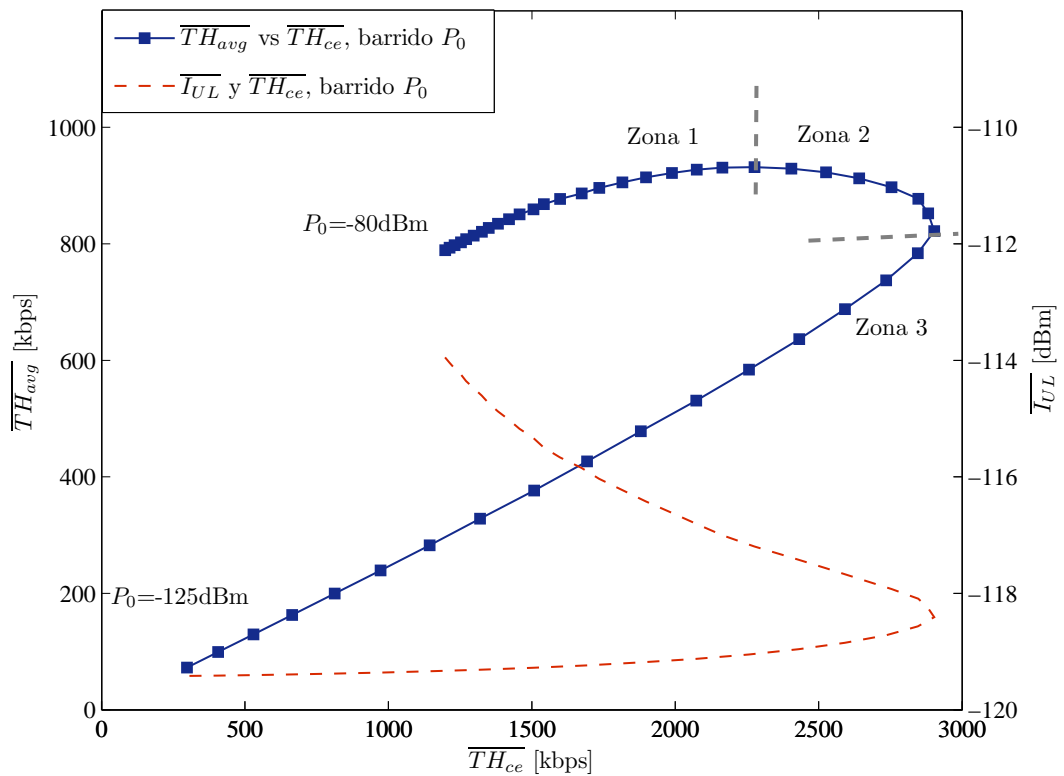


FIGURA A.5: Relación entre indicadores de capacidad, cobertura e interferencia para barrido de la potencia nominal,  $P_0$ .

degradación en la calidad de la señal recibida, de forma que tanto capacidad como cobertura se ven perjudicadas. De estos resultados, se puede deducir que la zona de trabajo adecuada para  $P_0$  es algún punto de la Zona 2, ya que es una zona de equilibrio entre capacidad y cobertura.

### Experimento 2: Sensibilidad a cambios de $\alpha$

En este experimento se fija  $P_0$  a un valor de -90 dBm, mientras que el factor de compensación de pérdidas de propagación se barre de 1 hasta 0.7. El objetivo del experimento es evaluar la sensibilidad del rendimiento de la red a cambios en  $\alpha$ .

La Figura A.6 representa los indicadores  $\overline{TH_{avg}}$  y  $\overline{I_{UL}}$  frente a  $\overline{TH_{ce}}$  para diferentes valores de  $\alpha$ . De la figura, se puede hacer un análisis similar al realizado en el *Experimento 1*, pues se observan igualmente tres zonas con diferente comportamiento. En la Zona 1, los indicadores de capacidad y cobertura suben cuando

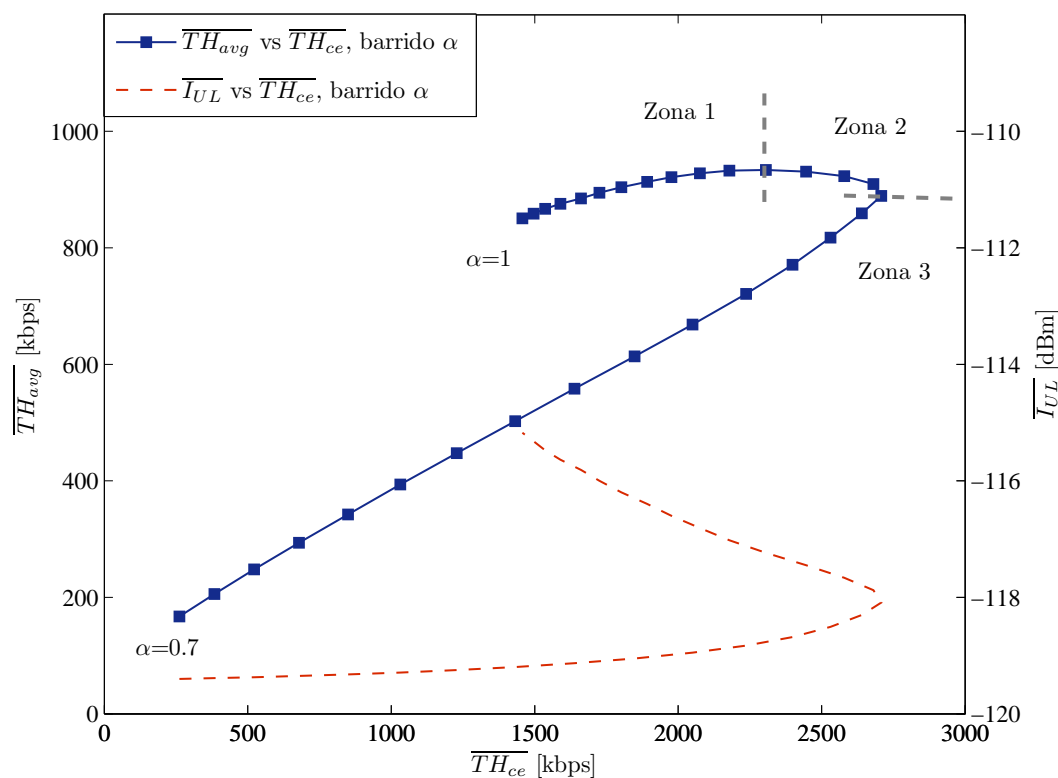


FIGURA A.6: Relación entre indicadores de capacidad, cobertura e interferencia para barrido del factor de compensación de pérdidas,  $\alpha$ .

se decrece  $\alpha$  hasta alcanzar un máximo para  $\alpha=0.89$ . Esto ocurre debido a que la reducción de la compensación de pérdidas se traduce en una reducción de los niveles de interferencia. Aunque también se reduce el nivel de señal recibido, en esta zona el efecto es mayor sobre la interferencia, lo que tiene un impacto positivo en capacidad y cobertura. En la Zona 2, donde  $0.89 \leq \alpha \leq 0.84$ , aunque la interferencia sigue reduciéndose y se mejora la cobertura, la capacidad se ve afectada negativamente. Finalmente, en la Zona 3, aunque la interferencia se sigue reduciendo ligeramente, tanto la capacidad como la cobertura empeoran debido a la reducción del nivel de señal recibida. De nuevo, la Zona 2 representa el mejor equilibrio entre capacidad y cobertura.

# Bibliografía

- [1] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), <http://www.3gpp.org/>, accedido en febrero 2015.
- [2] 3GPP TR 125.913, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN), v.7.3, abril 2013.
- [3] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, *LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 2009.
- [4] J. Lempiainen, M. Manninen, *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*. Springer, 2001.
- [5] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. John Wiley & Sons, 2002.
- [6] A. R. Mishra, *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G...Evolution to 4G*. John Wiley & Sons, 2004.
- [7] A. R. Mishra, *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G...Evolution to 4G*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] L. Song, J. Shen, *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*. CRC Press, 2011.
- [9] L. Korowajczuk, *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] J. Ramiro, K. Hamied, *Self-Organizing Networks: Self-Planning, Self-Optimization and Self-Healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons, 2011.

- [11] S. Hamalainen, H. Sanneck, C. Sartori, *LTE Self-Organising Networks (SON)*. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] J. Puttonen, H. Puupponen, K. Aho, T. Henttonen, M. Moisio, “Impact of control channel limitations on the LTE VoIP capacity,” *IEEE Ninth International Conference on Networks (ICN)*, pp. 77–82, abril 2010.
- [13] 3GPP TS 36.213, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures, v.8.8, septiembre 2009.
- [14] A. Hoikkanen, “Economics of 3G Long-Term Evolution: the Business Case for the Mobile Operator,” *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, pp. 1–5, julio 2007.
- [15] F. Gordejuela-Sanchez, J. Zhang, “LTE Access Network Planning and Optimization: A Service-Oriented and Technology-Specific Perspective,” *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–5, noviembre 2009.
- [16] T. Halonen, J. Romero, J. Melero, *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, 2003.
- [17] P. Curwen, J. Whalley, *Mobile Telecommunications Networks: Restructuring as a Response to a Challenging Environment*. Edward Elgar Publishing, 2014.
- [18] 3GPP TS 32.500, Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements, v.9, diciembre 2009.
- [19] A. Simonsson, A. Furuskar, “Uplink Power Control in LTE - Overview and Performance, Subtitle: Principles and Benefits of Utilizing rather than Compensating for SINR Variations,” *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2008.
- [20] J. Whitehead, “Signal-level-based dynamic power control for co-channel interference management,” *IEEE 43rd Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 499–502, mayo 1993.
- [21] W. Xiao, R. Ratasuk, A. Ghosh, R. Love, Y. Sun, R. Nory, “Uplink Power Control, Interference Coordination and Resource Allocation for 3GPP E-UTRA,” *IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2006.

- [22] A. Rao, "Reverse Link Power Control for Managing Inter-Cell Interference in Orthogonal Multiple Access Systems," *IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1837–1841, septiembre 2007.
- [23] B. Muhammad, A. Mohammed, "Performance Evaluation of Uplink Closed Loop Power Control for LTE System," *IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2009.
- [24] R. Müllner, C.F. Ball, M. Boussif, J. Lienhart, P. Hric, H. Winkler, K. Kremnitzer, R. Kronlachner, "Enhancing uplink performance in UTRAN LTE networks by load adaptive power control", *European Transactions on Telecommunications*, vol. 21, pp. 458-468, agosto 2010.
- [25] B. Muhammad, A. Mohammed, "Uplink closed loop power control for LTE system," *6th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, pp. 88–93, octubre 2010.
- [26] N. J. Quintero, *Advanced power control for UTRAN LTE uplink*. PhD thesis, Department of Electronic Systems, Aalborg University, junio 2008.
- [27] S. Yang, Q. Cui, X. Huang, X. Tao, "An Effective Uplink Power Control Scheme in CoMP Systems," *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2010.
- [28] 4G Americas, "The benefits of SON in LTE: Self-optimizing and self-organizing networks," Technical Report, diciembre 2009.
- [29] NGMN Use Cases Related to Self Organising Network, Overall Description, diciembre 2008.
- [30] 3GPP TS 32.521, Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunications Management; Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Requirements, v.9.0, marzo 2010.
- [31] C. Úbeda, D. Villa, C. Rosa, K. Pedersen, F. Calabrese, P. Michaelson, J. Michel, "Performance of Uplink Fractional Power Control in UTRAN LTE," *IEEE 67th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 2517–2521, mayo 2008.

- [32] C. Suh, A. Koc, S. Talwar, “Trade-off Power Control for Cellular Systems,” *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, noviembre 2009.
- [33] S. Xu, M. Hou, K. Niu, Z. He, W. Wu, “Coverage and capacity optimization in LTE network based on non-cooperative games,” *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 19, no. 4, pp. 14 – 42, agosto 2012.
- [34] A. Awada, B. Wegmann, I. Viering, A. Klein, “Optimizing the Radio Network Parameters of the Long Term Evolution System Using Taguchi’s Method,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 3825–3839, octubre 2011.
- [35] K. Majewski, M. Koonert, “Analytic uplink cell load approximation for planning Fractional Power Control in LTE networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 1081–1090, febrero 2013.
- [36] C. Úbeda, F. Calabrese, K. Pedersen, C. Rosa, “Uplink interference control in UTRAN LTE based on the overload indicator,” *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2008.
- [37] 3GPP R1-074349, Overload Indicator handling for LTE, TSG RAN WG1 #50bis meeting, v.8.6, septiembre 2007.
- [38] M. Dirani, Z. Altman, “Self-Organizing Networks in next generation radio access networks: Application to Fractional Power Control,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 2, pp. 431 – 438, febrero 2011.
- [39] 3GPP TS 36.201, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description, v.8.3, abril 2009.
- [40] 3GPP TR 36.942, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios, v.8.2, mayo 2009.
- [41] 3GPP TR 36.814, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects, v.9.0, marzo 2010.



- [42] S. Louvros, K. Aggelis, A. Baltagiannis, “LTE cell coverage planning algorithm optimising uplink user cell throughput,” *11th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, pp. 51–58, junio 2011.
- [43] NSN, “Understanding Smartphone Behavior in the Network,” *Nokia Solutions and Networks Smart Labs*, white paper, noviembre 2013.
- [44] 3GPP TS 36.211, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation, v.11.6, octubre 2014.
- [45] F. Persson, “Voice over IP Realized for the 3GPP Long Term Evolution,” *IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1436–1440, septiembre 2007.
- [46] 3GPP TS 36.321, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification, v.12.3, octubre 2014.
- [47] 3GPP TR 36.824, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE coverage enhancements, v.11.0, junio 2012.
- [48] J. Puttonen, T. Henttonen, N. Kolehmainen, K. Aschan, M. Moisio, P. Kela, “Voice-Over-IP Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink,” *IEEE 67th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 2502–2506, mayo 2008.
- [49] R. Love, R. Kuchibhotla, A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Classon, Y. Blankenship, “Downlink control channel design for 3GPP LTE,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 813–818, abril 2008.
- [50] J. Liu, R. Love, K. Stewart, M. Buckley, “Design and analysis of LTE physical downlink control channel,” *IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, abril 2009.
- [51] W. Dan, J. Haifeng, “Research of calculating CFI value used in LTE system,” *IEEE 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, pp. 2220–2223, mayo 2012.
- [52] D. López, C. Úbeda, I. Kovács, F. Frederiksen, K. Pedersen, “Performance of downlink UTRAN LTE under control channel constraints,” *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 2512–2516, mayo 2008.

- [53] F. Capozzi, D. Laselva, F. Frederiksen, J. Wigard, I. Kovács, P. Mogensen, “UTRAN LTE downlink system performance under realistic control channel constraints,” *IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, septiembre 2009.
- [54] L. Jingxiu, J. Wigard, Z. Zhao, D. Laselva, F. Frederiksen, “On the impact of realistic control channel constraints in UTRAN LTE TDD system,” *IEEE 16th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 1–5, noviembre 2010.
- [55] S. Lien, K. Chen, Y. Lin, “Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 66–74, abril 2011.
- [56] D. Calin, B. Kim, “LTE Application and Congestion Performance,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 5–25, junio 2013.
- [57] P. Osti, P. Lassila, S. Aalto, A. Larmo, T. Tirronen, “Analysis of PDCCH Performance for M2M Traffic in LTE,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, pp. 4357–4371, noviembre 2014.
- [58] W. Navidi, *Statistics for engineers and scientists*. McGraw-Hill Higher Education, 2008.
- [59] D. Hong, S.S. Rappaport, “Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized hand-off procedures,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 77–92, agosto 1986.
- [60] Y. Fang, I. Chlamtac, “Teletraffic analysis and mobility modeling of PCS networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 7, pp. 1062–1072, julio 1999.
- [61] S.S. Rappaport, “The multiple-call hand-off problem in high-capacity cellular communications systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 546–557, agosto 1991.
- [62] W. Li, A. Alfa, “A PCS network with correlated arrival process and splitted-rating channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 1318–1325, julio 1999.

- [63] P. Tran-Gia, M. Mandjes, “Modeling of customer retrial phenomenon in cellular mobile networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 8, pp. 1406–1414, octubre 1997.
- [64] M. Marsan, G. D. Carolis, E. Leonardi, R. L. Cigno, M. Meo, “Efficient estimation of call blocking probabilities in cellular mobile telephony networks with customer retrials,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 332–346, febrero 2001.
- [65] S.S. Rappaport, “Traffic performance of cellular communication systems with heterogeneous call and platform types,” *IEEE 2nd International Conference on Universal Personal Communications: Gateway to the 21st Century.*, vol. 2, pp. 690–695, octubre 1993.
- [66] Y. Fang, “Thinning schemes for call admission control in wireless networks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 52, no. 5, pp. 685–687, mayo 2003.
- [67] X. Lagrange, P. Godlewski, “Teletraffic analysis of a hierarchical cellular network,” *IEEE 45th Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 882–886, julio 1995.
- [68] P. Fitzpatrick, C. Lee, B. Warfield, “Teletraffic performance of mobile radio networks with hierarchical cells and overflow,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 8, pp. 1549–1557, octubre 1997.
- [69] S. Luna-Ramírez, M. Toril, V. Wille, “Performance analysis of dedicated signalling channels in GERAN by retrial queues,” *Wireless Personal Communications*, vol. 60, no. 2, pp. 215–235, septiembre 2011.
- [70] J. Luo, X. Li, “Physical Downlink Control Channel format selection of evolved node B in Long Term Evolution system,” *5th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, pp. 1494–1498, octubre 2012.
- [71] H. Tijms, *A first course in stochastic models*. John Wiley and Sons, 2003.
- [72] W. Stewart, *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton University Press Princeton, 1994.
- [73] 3GPP TS 23.203, Policy and charging control architecture, v.8.13, marzo 2012.

- [74] T.S. Ng, T.C. Chuah, Y.F. Tan, “QoS-based radio network dimensioning for LTE networks with heavy real-time traffic,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 27, pp. 2455–2480, octubre 2012.
- [75] N.A. Thompson, B.S. Northcote, “System and Process for dimensioning a cellular telecommunications network,” Patente US8630194 B2, enero 2014.
- [76] M. Toril, V. Wille, S. Luna-Ramírez, “Estimating pole capacity in a live HSDPA network,” *IEEE Communications Letters*, vol. 17, pp. 1260–1263, junio 2013.
- [77] V. Buenestado, J. Ruiz-Aviles, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, “Analysis of Throughput Performance Statistics for Benchmarking LTE Networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, pp. 1607–1610, septiembre 2014.
- [78] 3GPP TS 36.300, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Overall description, v.12.0, diciembre 2013.
- [79] C. Mehlhruer, J. Colom Ikuno, M. Simko, S. Schwarz, M. Wrulich, and M. Rupp, “The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, p. 29, julio 2011.
- [80] P. Muñoz, I. de la Bandera, F. Ruiz, S. Luna-Ramírez, R. Barco, M. Toril, P. Lázaro, J. Rodríguez. “Computationally-Efficient Design of a Dynamic System-Level LTE Simulator,” *Intl. Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 57, no. 3, pp. 347–358, septiembre 2011.
- [81] Cost Action 231, “Digital mobile radio towards future generation systems,” Final Report, 1999.