

ACTA DE EVALUACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Año académico 2016/17

DOCTORANDO: **ARCO VEGA, MIGUEL ANGEL DEL**
D.N.I./PASAPORTE: ******3285N**

PROGRAMA DE DOCTORADO: **D445 TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES**
DPTO. COORDINADOR DEL PROGRAMA: **TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES**
TITULACIÓN DE DOCTOR EN: **DOCTOR/A POR LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

En el día de hoy 19/6/2017, reunido el tribunal de evaluación nombrado por la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado de la Universidad y constituido por los miembros que suscriben la presente Acta, el aspirante defendió su Tesis Doctoral, elaborada bajo la dirección de **JOSE A. PORTILLA FIGUERAS // LUCAS CUADRA RODRÍGUEZ**.

Sobre el siguiente tema: *CONTRIBUCIÓN A LA PLANIFICACIÓN SISTÉMICA DE REDES MÓVILES 4G*

Finalizada la defensa y discusión de la tesis, el tribunal acordó otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL¹ de (no apto, aprobado, notable y sobresaliente): Sobresaliente

Alcalá de Henares, 19 de Junio de 2017.

EL PRESIDENTE



Fdo.: Antonio Carrasero

EL SECRETARIO



Fdo.: Sancho Salcedo

EL VOCAL



Fdo.: Michaela Chudean

Con fecha 29 de junio de 2017, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado, a la vista de los votos emitidos de manera anónima por el tribunal que ha juzgado la tesis, resuelve:

- Conceder la Mención de "Cum Laude"
 No conceder la Mención de "Cum Laude"

La Secretaria de la Comisión Delegada



FIRMA DEL ALUMNO,



Fdo.: Miguel A. del Arco Vega

¹ La calificación podrá ser "no apto" "aprobado" "notable" y "sobresaliente". El tribunal podrá otorgar la mención de "cum laude" si la calificación global es de sobresaliente y se emite en tal sentido el voto secreto positivo por unanimidad.

INCIDENCIAS / OBSERVACIONES:

—

El presente informe tiene como objetivo informar a la Junta de Gobierno del Centro de Estudios Científicos (CECyC) sobre el avance de los trabajos realizados durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de marzo de 2024. El informe se estructura en tres partes principales: un resumen ejecutivo, un desarrollo de los puntos clave y un cierre con conclusiones y recomendaciones.

En primer lugar, se detallan los principales logros alcanzados durante el periodo, así como los desafíos enfrentados y las acciones correctivas implementadas.



Universidad
de Alcalá

COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES
DE POSGRADO Y DOCTORADO

En aplicación del art. 14.7 del RD. 99/2011 y el art. 14 del Reglamento de Elaboración, Autorización y Defensa de la Tesis Doctoral, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado, en sesión pública de fecha 29 de junio, procedió al escrutinio de los votos emitidos por los miembros del tribunal de la tesis defendida por ARCO VEGA, MIGUEL ANGEL DEL, el día 19 de junio de 2017, titulada *CONTRIBUCIÓN A LA PLANIFICACIÓN SISTÉMICA DE REDES MÓVILES 4G*, para determinar, si a la misma, se le concede la mención "cum laude", arrojando como resultado el voto favorable de todos los miembros del tribunal.

Por lo tanto, la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado resuelve otorgar a dicha tesis la

MENCIÓN "CUM LAUDE"

Alcalá de Henares, 11 julio de 2017
EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS
OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO



Firmado digitalmente por VELASCO
PEREZ JUAN RAMON - DNI
03087239H
Fecha: 2017.07.12 15:30:30 +02'00'

Juan Ramón Velasco Pérez

Copia por e-mail a:

Doctorando: ARCO VEGA, MIGUEL ANGEL DEL

Secretario del Tribunal: SANCHO SALCEDO SANZ.

Directores de Tesis: JOSE A. PORTILLA FIGUERAS // LUCAS CUADRA RODRÍGUEZ



Universidad
de Alcalá

ESCUELA DE DOCTORADO
Servicio de Estudios Oficiales de
Posgrado

DILIGENCIA DE DEPÓSITO DE TESIS.

Comprobado que el expediente académico de D./D^a _____
reúne los requisitos exigidos para la presentación de la Tesis, de acuerdo a la normativa vigente, y habiendo
presentado la misma en formato: soporte electrónico impreso en papel, para el depósito de la
misma, en el Servicio de Estudios Oficiales de Posgrado, con el nº de páginas: _____ se procede, con
fecha de hoy a registrar el depósito de la tesis.

Alcalá de Henares a _____ de _____ de 20 _____



Fdo. El Funcionario



Universidad
de Alcalá

JOSE ANTONIO PORTILLA FIGUERAS
Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Campus Universitario s/n
28805 Alcalá de Henares (Madrid)
Telf: +34 91 885 66 80
Fax: +34 91 885 66 99
antonio.portilla@uah.es

D. JOSE ANTONIO PORTILLA FIGUERAS y D. LUCAS CUADRA RODRÍGUEZ,
Profesores Titulares de Universidad del Área de Conocimiento de Teoría de la Señal y
Comunicaciones de la Universidad de Alcalá,

CERTIFICAN

Que la tesis “Contribución a la planificación sistémica de redes móviles
4G”, presentada por D. Miguel Ángel del Arco Vega, realizada en el Departamento de
Teoría de la Señal y Comunicaciones bajo nuestra dirección, reúne méritos suficientes
para optar al grado de Doctor, por lo que puede procederse a su depósito y defensa.

Alcalá de Henares, 24 de Abril de 2017

Fdo. Dr. D. José Antonio Portilla Figueras

Fdo. Dr. D. Lucas Cuadra Rodríguez



Universidad
de Alcalá

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Campus Universitario s/n
28805 Alcalá de Henares (Madrid)
Telf: +34 91 885 88 99
Fax: +34 91 885 66 99

D. Miguel Ángel del Arco Vega ha realizado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, y bajo la dirección de los Doctores D. José Antonio Portilla Figueras y D. Lucas Cuadra Rodríguez, la Tesis Doctoral titulada “**Contribución a la planificación sistémica de redes móviles 4G**”, cumpliéndose todos los requisitos para la tramitación que conduce a su posterior lectura.

Alcalá de Henares, 24 de Abril de 2017

EL COORDINADOR DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
(Tecnologías de la Información y las Comunicaciones)

Fdo. Dr. D. Sancho Salcedo Sanz



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

Tesis Doctoral

CONTRIBUCIÓN A LA PLANIFICACIÓN
SISTÉMICA DE REDES MÓVILES 4G

Autor:

Miguel Ángel del Arco Vega

Directores:

Dr. José Antonio Portilla Figueras

Dr. Lucas Cuadra Rodríguez

2017

Abstract

Long Term Evolution (LTE) is the fastest developing mobile technology and one of the strongest driving forces of Mobile Telecommunication market. In turn, it is one of the most relevant and dynamic players in our globalized economy, and helps accelerate innovation in other markets. LTE offers unprecedented very high data rate and very low latency for a number of different applications and services, specially in downlink (DL). This is one of the reasons why LTE subscriptions have grown at a high rate during Q1 2016, with 150 million new subscriptions during this quarter, reaching a total of 1.2 billion worldwide. However, although huge traffic increases are good news for mobile operators, the negative counterpart is that revenues do *not* rise at the same rate. This leads to an increasing *gap* between traffic (which evolves exponential-like in time) and revenues (which grow at much slower rate than traffic because of the competition among operators). In the effort of achieving reasonable profit margins, operators aim at optimizing investments while preserving user's quality of service (QoS), via a twofold strategy: (1) selecting the best available technology, and (2) optimizing the deployment of network equipment. Specifically, the optimization of the Radio Access Network (RAN) –the set of base stations (BSs) or “evolved Node B” (eNB) in LTE– is crucial since it takes about 60% of total investment, and even a higher part of operational expenditures (OPEX).

Within this context, the purpose of this thesis consists in implementing novel algorithms and tools aiming at improving the dimensioning of LTE access networks.

On the one hand, this thesis tackles the problem of users assignment to eNBs in LTE mobile networks. We propose a model that aims at assigning \mathcal{N}_U users to \mathcal{N}_B eNBs by minimizing a function called Download Time of the complete System (DTS), defined as the minimum time required for *all* the users in the system to complete their downloads. This strategy helps the network use its resources in a more balanced way, by assigning users from cells –which otherwise would be overloaded when using a simple Channel Quality Indicator (CQI)-based approach– to others with less load. The user-cell association problem is, in general, a combinatorial hard NP problem. Although other approaches indirectly tackle this complexity by transforming the problem into another whose optimal solution is less difficult (but still with very high computational cost), we tackle directly our DTS minimization problem by finding an approximate solution provided by a specific implementation of an Evolutionary Algorithm (EA). Its most interesting aspect is the way in which the candidate solutions (user-cell assignments) are coded. The chromosome is a vector of dimension \mathcal{N}_U in which each element represents

a user. The element in position j contains some information about the user u_j . That information is an integer representing which eNB of the available \mathcal{N}_U has been associated to that user. The mutation, crossover, and selection operators are designed to work with this encoding. The crossover operator, in particular, is a tournament of all against all. The other novel aspect of the implementation of the proposed evolution algorithm is found in the initial population. As we have information about a suboptimal solution of the problem (that provided by the conventional method based on CQI –which assigns a user to the eNB for which it has the best CQI–), this is included in the initial population, and the rest of the individuals are generated, basically, by applying the mutation and crossover operators on that solution. In any case, the solution found (association of each user to an eNB) is better (less DTS) than the assignment made with conventional methods.

On the other hand, the complete dimensioning tool, which includes the aforementioned EA for the user-cell association problem, exhibits (1) a simple and efficient parameterization of the multiple input parameters and the initial location of the eNBs, which (2) allows simulating a multi-service and multi-user environment, using (3) different user-eNB association methods, and (4) several scheduling algorithms, so that (5) the Minimum Download Rate required for each service is guaranteed. To fulfill the requirements (1)-(5), the tool computes the average speed of the services offered, taking into account the download times of each of the users. If, when using the number of eNB previously computed, the rate demanded by the different simulated services is fulfilled, then the value is assumed to be valid. Otherwise, a new eNB is added iteratively until the above requirement is fulfilled. None of the available tools is able to meet these requirements.

A variety of experiments in different realistic scenarios points out that the proposed method outperforms the conventional CQI-based and Load-Balancing approaches, specially in urban and dense urban environments (where the assignment is more critical in terms of capacity). We have also tested our approach in simple scenarios that mimic Heterogeneous Networks and Ultra-Dense Networks in which the number of users is similar to that of nodes, proving its beneficial properties. Our method is aimed at the design/dimensioning stage and not to the operation stage, and, in this sense, it is an *off-line* algorithm that could be useful to make better decisions on cost-effective network dimensioning and upgrading.

Resumen extenso

Long Term Evolution (LTE) es el estándar móvil de mayor desarrollo hasta la actualidad, y uno de los mayores motores del mercado de las Telecomunicaciones Móviles, contribuyendo a una aceleración de la innovación en otros mercados. Su gran aceptación está siendo impulsada por una fuerte demanda de nuevos dispositivos (*smartphones*), aplicaciones y servicios e, incluso, por cambios socio-económicos. Todos estos factores combinados están alimentando una creciente demanda de nuevos servicios con mayor necesidad de descarga de datos, muy intensivos en términos de Mbps (tales como TV, vídeo bajo demanda o juegos).

Aunque el gran aumento de tráfico de datos es una buena noticia para los operadores, la contrapartida se encuentra en que los ingresos no suben al mismo ritmo. Esto conduce a un aumento de la brecha entre el tráfico (que evoluciona exponencialmente en el tiempo) y los ingresos (que crecen a ritmo mucho más lento que el tráfico). Con el fin de conseguir márgenes de beneficios razonables, los operadores móviles tienen como objetivo la optimización de sus inversiones, preservando la calidad de servicio a través de una estrategia doble: la selección de la mejor tecnología disponible y la optimización del despliegue de los equipos de red.

En este contexto, el *objetivo* de esta Tesis consiste en el diseño, implementación y prueba de algoritmos, tanto *convencionales* –utilizados actualmente en la industria– como otros novedosos basados en *Computación Evolutiva*, que constituyan una contribución novedosa a la *planificación sistémica* de redes móviles LTE. En particular, se centra en el *dimensionamiento estratégico* de la red de acceso de LTE, ya que ésta constituye aproximadamente el 60% de la inversión total, e incluso una parte más elevada de los gastos OPEX (*operating expense*). La herramienta y los algoritmos que se proponen en esta tesis pueden ayudar a los operadores a mejorar sus diseños previos al despliegue y a cuantificar la mejora potencial que se conseguiría en la red al añadir un nuevo nodo.

Desde un punto de vista conceptual, la Tesis Doctoral se puede considerar dividida en dos partes distintas pero fuertemente relacionadas dentro del ámbito del diseño de la red de acceso LTE, con *aplicaciones* potenciales tanto en investigación como en la industria de las comunicaciones móviles.

Por un lado, la Tesis establece una *novedosa propuesta* para el problema de asignación o *asociación* de usuarios a eNBs (*evolved NBs*) en LTE. La contribución en este aspecto es doble: por un lado se *plantea un nuevo método* para asociar N_U usuarios a N_B eNBs en redes LTE. Consiste éste en modelar la asociación usuario-eNB como un problema de optimización combinatoria en el que la función a minimizar es una *métrica*

Resumen

novedosa llamada “Tiempo de descarga total del sistema” –*Download Time of the complete System* (DTS). La minimización de DTS se traduce en una asignación de usuarios a celdas más eficiente que la que se consigue con métodos convencionales como el basado en maximizar CQI (*Channel Quality Indicator*) o en balanceo de carga (*Load Balancing* –LB–). Nuestra propuesta permite la asignación de usuarios desde celdas que, de otra forma, estarían sobrecargadas a otras con menos carga. Esto tiene un doble beneficio, tanto para el operador como para los usuarios. Por una parte, ayudar al operador de red a utilizar sus recursos de una manera más equilibrada y rentable. Por otra parte, la estrategia propuesta reduce el tiempo de descarga para la *mayoría de los usuarios*, introduciendo así cierta *equidad* en el reparto de recursos. La minimización de DTS es, sin embargo, un problema de gran complejidad computacional. Ésta es justamente la razón que ha motivado la segunda contribución al problema de asociar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs en LTE: abordar el problema de la minimización de DTS mediante un algoritmo evolutivo (EA). El aspecto más interesante del algoritmo evolutivo propuesto es la forma en la que se realiza la codificación de las soluciones (asignaciones usuario-celda) candidatas. El cromosoma es un vector de dimensión \mathcal{N}_U en el que cada elemento representa un usuario. El elemento en la posición j contiene cierta información sobre el usuario u_j . Esa información es un número entero que representa a qué eNB de los \mathcal{N}_U disponibles se ha asignado dicho usuario. Los operadores de mutación, cruce y selección se han diseñado para que puedan trabajar con esta codificación. El operador de cruce, en particular, es un torneo de todos contra todos. El otro aspecto novedoso de la implementación del algoritmo evolutivo propuesto se encuentra en la población inicial. Como se tiene información de una solución subóptima del problema (la proporcionada por el método convencional basado en CQI –que asigna cada usuario al eNB para el cual tiene mejor CQI–), se incluye ésta en la población inicial, y el resto de los individuos se genera, básicamente, aplicando los operadores de mutación y cruce sobre esa solución. En cualquier caso, la solución encontrada (asociación de cada usuario a un eNB) es mejor (menor DTS) que la asignación realizada con métodos convencionales.

Por otro lado, el segundo conjunto de contribuciones de la Tesis consiste en el diseño de una herramienta de planificación estratégica LTE, centrada en el proceso de *dimensionado* de red en un entorno multiusuario y multiservicio, y en la que se ha integrado en módulo EA de asociación usuario-eNB. Mediante esta integración, la herramienta permite realizar comparativas entre el método de asociación usuario-eNB propuesto y otros métodos convencionales, también integrados en la herramienta, como los basados en CQI y en LB. En concreto, la herramienta tiene (1) una parametrización sencilla y eficaz de los múltiples parámetros de entrada y de la ubicación inicial de los eNB, que

(2) permite simular un entorno multi-servicio y multi-usuario, empleando (3) diferentes algoritmos de asociación usuario-eNB –como el propuesto en la Tesis– y (4) varios algoritmos de *scheduling*, de forma que (5) se garantiza el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga Mínima de cada servicio. Para cumplir los requisitos (1)–(5), la herramienta calcula la velocidad media de los servicios ofertados, teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNBs, calculados previamente, se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios simulados, entonces se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento, se añaden eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior. Ninguna de las herramientas disponibles en el mercado, tanto comerciales como basadas en software libre, es capaz de cumplir estos requisitos.

Para cuantificar en qué medida la herramienta desarrollada, en general, y nuestra propuesta de asignación usuario-celda, en particular, son útiles en el dimensionamiento de LTE, se han llevado a cabo un conjunto amplio y variado de simulaciones, en *diferentes escenarios realistas*, tanto urbano como urbano denso, y se han comparado con dos métodos de asignación usuario-celda convencionales basados en CQI y en LB. Estos experimentos muestran que el método propuesto supera claramente a los convencionales, especialmente en áreas urbanas y urbana densa (entornos donde la asignación es más crítica en términos de capacidad) con macro-celdas de LTE, e incluso, en escenarios que modelan redes heterogéneas y ultra densas.

Agradecimientos

Esta tesis doctoral no es fruto sólo de mi trabajo. Se debe al esfuerzo directo o indirecto de distintas personas que han participado de la misma. Ahora, cuando uno le dedica tiempo a pensar, te das cuenta de cuánto tienes que agradecer y a cuánta gente.

Recuerdo cuando contacté con el Dr. Antonio Portilla mostrando interés por realizar el doctorado en una línea de investigación de la que era Director. Su respuesta afirmativa fue inmediata y comenzó este proyecto al que poco tiempo después se incorporó el Dr. Lucas Cuadra. Mi más sincero agradecimiento a ambos, por el apoyo y confianza recibido en todo momento, por vuestra capacidad de orientación en esta ardua tarea, por la gran cantidad de tiempo que me habéis dedicado y vuestra valiosa dirección. También quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Sancho Salcedo. Entre otras cosas, en mi memoria queda que, tan sólo 10 minutos reunido con él, sirvió para dar un giro al algoritmo planteado en esta tesis. Muchas gracias de corazón. Ha sido un verdadero placer trabajar con vosotros y me encantaría seguir haciéndolo en un futuro.

En este proceso, igualmente, ha sido de gran valor el contar con la labor de los estudiantes que realizaron su Trabajo Fin de Grado conmigo, Eduardo, Sergio, Santi y Luis. Gracias chicos por vuestra paciencia y buen hacer.

Cómo no hacer extensivo el agradecimiento a todos los que ocupáis un lugar especial en mi vida y que no he podido ver con la frecuencia que me hubiera gustado en estos años. José Carlos, eres ejemplo de superación. Lourdes, por tu confianza en mí. José Manuel, en cierto modo te he querido demostrar que, con esfuerzo, conseguirás lo que te propongas. De la misma forma, mi agradecimiento a aquellas personas que han estado presentes en mi camino y, aún sin estar ya, han puesto su grano de arena.

Y, finalmente, agradecer profundamente a mis padres, por ser fuente de inspiración y superación, mostrándome confianza ciega y plena siempre y apoyándome en todo momento. A pesar de la distancia geográfica, siempre los he sentido a mi lado, entendiendo mis ausencias y estando a mi lado de forma incondicional. Gracias Papá. Gracias Mamá.

¡Va por vosotros!

Miguel A. del Arco

*Todos llevamos dentro una insospechada fuerza
que emerge cuando la vida nos pone a prueba.*

– Isabel Allende –

Índice

Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XV
Lista de Acrónimos	XVII
Lista de Símbolos	XXIII
I Motivación, objetivos, fundamentos y estado del arte	1
1 Introducción	3
1.1 Motivación	3
1.2 Comunicaciones móviles: contexto actual y reciente	5
1.2.1 Evolución de HSPA-HSPA+	7
1.2.2 Evolución de LTE-LTE Advanced	11
1.3 Dimensionamiento de red LTE: una introducción	15
1.4 Objetivo y estructura de la Memoria de Tesis Doctoral	16
2 Revisión de aspectos fundamentales de LTE	19
2.1 Arquitectura de red LTE	19
2.1.1 Equipamiento de usuario	21
2.1.2 Red de acceso	23
2.1.3 Núcleo de red	25
2.2 Gestión de recursos radio en LTE	27
2.2.1 Introducción	27
2.2.2 Aspectos básicos de LTE	29
2.2.3 <i>Packet scheduling</i>	35
2.2.3.1 Estrategias de <i>scheduling</i>	37

ÍNDICE

3	Revisión del estado del arte	39
3.1	Dimensionamiento de red LTE: fundamentos y estado del arte	40
3.1.1	Fases del proceso de planificación de red LTE	40
3.1.2	Consideraciones generales del proceso de dimensionado	43
3.1.3	Dimensionado: trabajos relacionados	47
3.2	Herramientas de planificación de red: estado del arte	48
3.2.1	Herramientas comerciales: revisión	48
3.2.1.1	Atoll	48
3.2.1.2	Mentum Planet	49
3.2.1.3	Asset	50
3.2.1.4	ASTRIX Radio Planning System	50
3.2.1.5	CELPLA L	51
3.2.2	Herramientas no comerciales: estado del arte	52
3.2.2.1	<i>LTE downlink level and system level simulator</i>	52
3.2.2.2	LTE-SIM	53
3.3	El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica	54
3.3.1	Métodos de asociación usuario-celda basados en la calidad de la señal: revisión bibliográfica	56
3.3.2	Métodos basados en Balanceo de Carga: revisión bibliográfica . .	58
3.3.2.1	Visión global de las diferentes aproximaciones	58
3.3.2.2	Caso particular en LB: transformación del problema, op- timización convexa, soluciones exactas y aproximadas: revisión	59
3.4	Algoritmos evolutivos en LTE: estado del arte	63
3.4.1	Conceptos básicos de algoritmos evolutivos	63
3.4.2	Algoritmos evolutivos en LTE	66
3.5	Conclusiones	69
4	Objetivos y contribuciones	73
4.1	Objetivos detallados	73
4.2	Contribuciones	74
4.3	Estructura de la Parte II de la Memoria de Tesis Doctoral	77

II	Contribuciones, simulaciones y resultados numéricos	79
5	Asignación de usuarios a celdas en LTE: modelado y solución mediante un algoritmo evolutivo	81
5.1	Motivación, posicionamiento y contribuciones	82
5.1.1	Motivación	82
5.1.2	Posicionamiento de la propuesta en la literatura especializada	83
5.1.2.1	El problema genérico de la asociación usuario-celda en redes multi-celda	83
5.1.2.2	Algoritmos evolutivos en LTE	85
5.1.3	Objetivo y contribuciones	86
5.2	Formulación matemática del problema	88
5.3	Algoritmo evolutivo propuesto	92
5.3.1	Conceptos biológicos básicos en los que se inspira	93
5.3.1.1	Correspondencia entre genotipo y fenotipo	93
5.3.1.2	Evolución natural	93
5.3.2	Extrapolando conceptos: algoritmo evolutivo	94
5.3.2.1	Propuesta de método de codificación	95
5.3.2.2	Propuesta de población inicial	96
5.3.2.3	Implementación de operadores genéticos	98
5.4	Perspectivas prácticas	101
5.5	Resumen del Capítulo	102
6	Herramienta de simulación para planificación LTE	107
6.1	Características generales	109
6.2	Herramienta software de planificación de red LTE	113
6.3	Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación	117
6.3.1	Planteamiento	118
6.3.2	Resultados	120
6.4	Conclusiones	124
7	Experimentos y resultados	129
7.1	Marco de referencia: métodos convencionales y métrica de comparación	130
7.1.1	Métrica de comparación	131
7.1.2	Métodos convencionales de asociación usuario-celda	131
7.1.2.1	Método de comparación 1: Asignación basada en CQI	132
7.1.2.2	Método de comparación 2: CQI-LB	132

7.2	Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos . . .	133
7.2.1	Distribución uniforme de usuarios	133
7.2.2	Distribución gaussiana de usuarios	137
7.3	Sensibilidad de parámetros del EA respecto del entorno	140
7.4	Simulaciones en redes LTE convencionales	143
7.4.1	Marco de referencia y observaciones preliminares	144
7.4.2	Diseño de experimentos	145
7.4.3	Eficiencia del método propuesto en despliegues óptimos	147
7.4.4	Método propuesto y variación del número de eNBs, \mathcal{N}_B	149
7.5	Ejemplo sencillo de red ultra-densa	153
7.6	Resumen y conclusiones	155
III	Conclusiones y líneas de trabajo futuras	159
8	Resumen y conclusiones	161
8.1	Resumen	161
8.2	Conclusiones	168
8.3	Líneas de trabajo futuras	172
8.3.1	Línea de trabajo de modelado y simulación	172
8.3.2	Campo de herramientas de planificación estratégica de red	173
	Bibliografía	175
	Lista de Publicaciones	195

Lista de Figuras

1.1	Evolución de los estándares 3GPP durante la última década, junto con sus principales características y/o novedades. (Fuente: elaboración propia).	6
1.2	Esquema simplificado representando la evolución hacia una arquitectura simplificada. (Fuente: elaboración propia)	10
1.3	Evolución de las comunicaciones móviles desde década de los 80 a la actualidad, ilustrando las principales tecnologías y velocidades binarias. (Fuente: elaboración propia a partir de [28]).	14
2.1	Arquitectura de alto nivel de EPS. (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).	20
2.2	Arquitectura EPS. (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).	20
2.3	Arquitectura UE (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).	21
2.4	Funciones de eNB y conexiones con otros nodos (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).	24
2.5	Conexiones de MME con otros nodos y principales funciones (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).	26
2.6	Representación simplificada de señales de comunicación (línea azul continua) e interferencias (línea negra discontinua) sobre enlace de referencia $u_l \leftrightarrow B_k$. p_{e,B_y} representa la potencia emitida por un eNB genérico B_y . (Fuente: elaboración propia).	30
2.7	Representación de RB y TTI. (Fuente: elaboración propia).	31
2.8	Representación esquemática en dos dimensiones (tiempo, frecuencia) de RB con CP normal. (Fuente: elaboración propia).	32
2.9	Diversidad multiusuario. (Fuente: elaboración propia).	36
2.10	Esquema de scheduler. (Fuente: elaboración propia).	37

LISTA DE FIGURAS

3.1	Representación de las fases de planificación de red a alto nivel. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).	40
3.2	Información necesaria en Fase 1. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).	41
3.3	Información necesaria en Fase 2. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).	42
3.4	Esquema de la información necesaria en Fases 3 y 4. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).	43
3.5	Dimensionado de red LTE. (Fuente: elaboración propia a partir de [51]).	44
3.6	Entradas y salidas para cálculo de enlace radio. (Fuente: elaboración propia a partir de [51]).	45
3.7	Representación ilustrativa del conjunto de ganancias y pérdidas necesarias para cálculo de MAPL. (Fuente: elaboración propia).	46
5.1	Esquema simplificado mostrando el cálculo de la interferencia i_{R,u_l} que recibe el usuario $u_l \in B_k$ desde otros eNBs, B_h , con $h \neq k$	91
5.2	(a) Representación simplificada de un cromosoma en una red simple con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (b) Solución candidata (asignación de los $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios a los $\mathcal{N}_B = 4$ Nodo B Evolucionado – <i>Evolved Node B</i> – (eNB)s) codificados por el cromosoma representado en (a). . .	96
5.3	Representación simplificada de la forma en la que funciona el operador de cruce implementado. Corresponde a un caso con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (a) Cromosomas padre y madre <i>antes</i> y <i>después</i> de la aplicación del operador de cruce. (b) Asignación correspondiente (fenotipo) antes y después de la aplicación del operador de cruce.	100
5.4	Representación simplificada de la forma en la que funciona el operador de mutación en un caso con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (a) La posición 8 se ha seleccionado aleatoriamente, su valor (1) se cambió también aleatoriamente ($1 \rightarrow 2$). (b) Asignación codificada (fenotipo) antes y después de la aplicación del operador.	101
6.1	Representación conceptual de la integración del simulador dentro de la herramienta de planificación de red LTE.	108
6.2	Ventana inicial. Permite cargar un escenario que contiene un conjunto de datos sobre el <i>entorno</i> a simular (Rural, Urbano, Suburbano o Denso) y sobre las <i>características</i> de la red LTE y de los <i>servicios</i> a prestar. . .	110

6.3	Representación de los tres bloques de parámetros de entrada de la herramienta de simulación: parámetros generales (“P. Generales”), parámetros de eNB (“P. eNB”) y parámetros de servicio (“P. Servicio”).	111
6.4	Captura de la ventana donde se introducen los parámetros generales. . .	113
6.5	Diagrama de flujo general de la herramienta.	114
6.6	Entradas y salidas en el cálculo de enlace radio [11].	115
6.7	Propuesta de ejercicio práctico.	118
6.8	Asignación usuario-eNB obtenida mediante el método convencional basado en CQI, que asigna cada usuario al eNB para el cual tiene mayor Indicador de Calidad de Canal – <i>Channel Quality Indicator</i> – (CQI) (equivalentemente, mejor Relación Señal Ruido Interferencia – <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> – (SINR)). Los eNB se representan mediante el símbolo *, mientras que cada usuario se representan mediante el símbolo +. Cada usuario se representa con el color del eNB al que ha sido asignado. . . .	120
6.9	Throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 utilizando el scheduler Round Robin. El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.	121
6.10	Throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 utilizando el scheduler Proportional Fair. El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.	121
6.11	Visión ampliada del throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 . El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.	122
6.12	Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario asignado al eNB B_1 cuando éste utiliza Proportional Fair. Los usuarios están ordenados y etiquetados en orden decreciente de CQI. Los usuarios tienen diferentes servicios $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ (Tabla 6.2) con velocidad de pico ($R_{b,peak}^{S_i}$) de valores 10, 1, 0.1 y 20 Mbps, respectivamente.	123
6.13	Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario asignado al eNB B_1 cuando éste utiliza Round Robin. Los usuarios están ordenados y etiquetados en orden decreciente de CQI. Los usuarios tienen diferentes servicios $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ (Tabla 6.2) con velocidad de pico ($R_{b,peak}^{S_i}$) de valores 10, 1, 0.1 y 20 Mbps, respectivamente.	123

LISTA DE FIGURAS

6.14	Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario del eNB B_1 usando Proportional Fair y ordenados por CQI y velocidad de pico del servicio demandado (en sentido decreciente).	124
7.1	(a) Asignación de usuario conseguida mediante método convencional (Método Convencional – <i>Conventional Approach</i> – (CA)) basado en CQI. (b) Asignación obtenida por la estrategia propuesta (Método Propuesto – <i>Proposed Approach</i> – (PA)). En ambos casos, el área de servicio $\mathcal{A} = 1 \text{ km}^2$, con $N_B = 8$ eNBs, $N_U = 698$ usuarios activos, con distribución uniforme). . .	134
7.2	Tiempo de descarga total del sistema, DTS(s), en función del número de generación de Algoritmo Evolutivo – <i>Evolutionary Algorithm</i> – (EA) propuesto. La línea de color rojo representa, para cada generación, el valor medio, mientras que la línea azul corresponde al mejor (menor DTS). La línea negra constante muestra el valor de DTS usando el método basado en CQI.	136
7.3	Asignación usuario-eNB en el caso de estudio en el que los clientes se localizan alrededor de B_3 con una distribución gaussiana (\mathcal{G}) con valor medio $\mu_{\mathcal{G}} = (0.5 \text{ km}, 0.5 \text{ km})$ y desviación estándar $\sigma_{\mathcal{G}} = (0.05 \text{ km}, 0.05 \text{ km})$. (a) Asignación obtenida mediante CQI-LB. (b) Asignación de usuarios obtenida mediante la metodología propuesta.	138
7.4	Mejora porcentual del método propuesto (PA) con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$ –Expresión (7.2)–, en función de la probabilidad de mutación, p_{mut} , en (a) un entorno denso urbano (Urbano Denso – <i>Dense Urban</i> – (DU)), y (b) en un entorno urbano (Urbano – <i>Urban</i> – (U)).	142
7.5	Mejora porcentual del método propuesto PA con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$ –Expresión (7.2)– en función de la probabilidad de cruce, p_{cross} , en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U).	142
7.6	Mejora porcentual del método propuesto con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$ –Expresión (7.2)–, en función de la probabilidad del tamaño de población, $\mathcal{P}_{\text{size}}$, en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U).	143

7.7	(a) Valor medio del Tiempo de Descarga total del Sistema, DTS, $\overline{\text{DTS}}$ (s), calculada sobre 10 distribuciones (Sección 7.4.2), para un despliegue óptimo en entornos denso urbano (DU) ($\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs) y urbano (U) ($\mathcal{N}_B^{\text{opt,U}} = 9$ eNBs) –Tabla 7.1–, empleando, respectivamente, el enfoque convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules). (b) $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$ o reducción <i>relativa</i> de $\overline{\text{DTS}}$ que el método propuesto consigue respecto al convencional –Expresión (7.6)– en el despliegue óptimo en entorno DU y U, respectivamente.	148
7.8	(a) $\overline{\text{DTS}}$ (s) en función del número de eNBs, calculado mediante el método convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules) en un entorno DU. (b) Reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$ del método propuesto (con respecto del convencional) –Expresión 7.6–, $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$, en función del número de eNBs en un entorno denso urbano. $\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs es el número óptimo (mínimo) de eNBs para conseguir cobertura.	149
7.9	(a) $\overline{\text{DTS}}$ (s) en función del número de eNBs, calculado mediante el método convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules) en un entorno U. (b) Reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$ del método propuesto (con respecto del convencional) –Expresión 7.6–, $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$, en función del número de eNBs en un entorno denso urbano. $\mathcal{N}_B^{\text{opt,U}} = 9$ eNBs es el número óptimo (mínimo) de eNBs para conseguir cobertura.	151
7.10	Reducción relativa de $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ al aumentar el número de eNBs desde $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a \mathcal{N}_B^{H} , $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, en función del entorno: denso urbano (DU) y urbano (U). Se corresponde con un posible despliegue de red añadiendo un 20% más de eNBs (con respecto del valor óptimo) en DU ($\mathcal{N}_B^{\text{H,DU}} = 6$) y U ($\mathcal{N}_B^{\text{H,U}} = 11$).	152
7.11	Asociación usuario-celda obtenidas mediante el método basado en CQI (a), el método CQI-LB (b) y el propuesto (c).	153
7.12	DTS (s) calculado usando la asociación usuario-celda proporcionada por el modelo basado en CQI, en LB, y en el enfoque propuesto.	154

Lista de Tablas

1.1	Mejoras de HSPA+ e impacto en la velocidad de transferencia de datos, tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente.	9
2.1	Categorías y capacidades de UE [40].	23
2.2	Número de RBs (N_{RB}) en función del ancho de banda del sistema LTE (BW) [46].	32
2.3	Técnicas de Modulación y Codificación (MCS) en función del CQI en LTE [47]. SINR _M refiere al máximo valor de la relación señal ruido interferencia (SINR) para cada valor de CQI. ECR ^{MCS} establece la tasa efectiva de codificación.	34
2.4	TBS index (I_{TBS}) en función de I_{MCS} y Q [47].	34
2.5	TBS (en bits) en función del índice TBS (I_{TBS}) y del número de PRBs (N_{PRB}), de acuerdo a la especificación técnica del 3GPP 36.213 [47]. . .	34
6.1	Datos utilizados para los diferentes tipos de entornos explorados: Urbano Denso (DU) y Urbano (U). $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ fija la densidad de población (habitantes/km ²) mientras $\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ etiqueta la correspondiente densidad de usuarios activos. \mathcal{A}_{CLU} es el área de cada entorno.	119
6.2	Resumen de parámetros característicos de los servicios estudiados en el ejercicio práctico propuesto. $R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ fija el régimen binario pico del servicio S_i , mientras que $\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ y γ^{S_i} representan, respectivamente, “market penetration” y la porción de usuarios activos (respecto a la población total) con el servicio S_i	119

7.1	<p>Datos utilizados para los diferentes tipos de entorno o “clutter”: denso urbano (DU), urbano (U), and rural (Rural (R)). $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ representa la densidad de población (habitantes/km²) mientras que $\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ es la correspondiente densidad de usuarios activos. $N_B^{\text{opt,clu}}$ es el número óptimo de eNBs para proporcionar cobertura [51, 56]. \mathcal{A}_{CLU} es el área de cada entorno, en km².</p>	141
7.2	<p>Resumen de parámetros característicos de los servicios analizados en este trabajo. $R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ es la tasa pico del servicio S_i, mientras que $\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ y γ^{S_i} representan, respectivamente, la tasa de penetración del servicio S_i y la fracción de usuarios activos (respecto a la población total) con dicho servicio S_i.</p>	145

Lista de Acrónimos

- 3G** Tercera Generación –*Third Generation*–. 3
- 3GPP** *Third Generation Partnership Project*–. 5, 58
- 4G** Cuarta Generación –*Forth Generation*–. 3, 5
- 5G** Quinta Generación –*Fifth Generation*–. 54, 139
- AFP** Planificación de Frecuencias Automática –*Automatic Frequency Planning*–. 49
- AMC** Modulación y Codificación Adaptativa –*Adaptative Modulation and Coding*–. 36, 52
- AP** Puntos de Acceso, *Access Points*–. 83
- BA** Asignación de Referencia –*Benchmark Assignment*–. 97
- BLER** Tasa de Error de Bloque –*Block Error Ratio*–. 29, 52
- BS** Estación Base –*Base Station*–. 75, 83
- BSS** Subsistema de Estación Base –*Base Station Subsystem*–. 4
- CA** Método Convencional –*Conventional Approach*–. XII, 131, 133, 146, 147
- CDMA** Acceso Múltiple por División de Código –*Code Division Multiple Access*–. 49
- CNR** Tasa de Ruido a Portadora –*Carrier to Noise Ratio*–. 50
- CoMP** Transmisión Multipunto Coordinada –*Coordinated Multipoint*–. 13
- CPC** “Conectividad de paquetes continua” –*Continuous Packet Connectivity*–. 8

Lista de Acrónimos

- CQI** Indicador de Calidad de Canal –*Channel Quality Indicator*–. XI, XV, 29, 32, 33, 82, 83, 89, 97, 107, 116, 120, 125, 126, 130, 131, 132, 133, 135, 137, 141, 143, 146, 152, 155, 166, 168
- CQI-LB** –*Channel Quality Indicator - Load Balancing association method*–. 116, 125, 126, 131, 137, 155, 168
- DL** Enlace Descendente –*Downlink*–. 3, 47, 49, 56
- DTS** “Tiempo de descarga total del sistema” –*Download Time of the complete System*–. 17, 61, 70, 75, 77, 81, 82, 84, 86, 88, 92, 94, 98, 102, 103, 126, 131, 135, 137, 140, 141, 143, 147, 155, 157, 162, 163, 166, 169, 170
- DU** Urbano Denso –*Dense Urban*–. XII, XV, 45, 141, 142, 143, 147
- ECR** Tasa Efectiva de Codificación –*Effective Code Rate*–. 33
- EPS** Sistema de Paquetes Evolucionado –*Evolved Packet System*–. 19
- e-UTRAN** *Evolved UMTS RAN*–. 19, 20
- EA** Algoritmo Evolutivo –*Evolutionary Algorithm*–. XII, 16, 17, 63, 70, 77, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 92, 94, 97, 98, 103, 104, 129, 135, 136, 140, 146, 161, 162, 166
- EDGE** Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM –*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*–. 3, 49, 50, 163
- eICIC** Coordinación Optimizada de Interferencia Inter-Celda –*Enhanced Inter-Cell Interference Coordination*–. 13
- eMBMS** Servicios Multimedia Broadcast-Multicast Evolucionados –*Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services*–. 13
- eNB** Nodo B Evolucionado –*Evolved Node B*–. X, XV, 4, 19, 39, 43, 46, 47, 53, 75, 76, 81, 82, 83, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 98, 100, 101, 102, 129, 132, 133, 135, 137, 140, 141, 143, 145, 161
- EPC** Núcleo de Paquetes Evolucionado –*Evolved Packet Core*–. 7, 19, 20
- FDD** Duplexado por División de Frecuencia –*Frequency Division Duplex*–. 12, 30
- FUA** Asociación de Usuario Fraccionaria –*Fractional User Association*–. 61

- GA** Algoritmo Genético –*Genetic Algorithm*–. 63, 67, 68, 85
- GGSN** Nodo de Soporte de Pasarela GPRS –*Serving GPRS Support Node*–. 9
- GPRS** Servicio General de Paquetes via Radio –*General Packet Radio Service*–. 49, 50
- GSM** Sistema Global para las Comunicaciones Móviles –*Global System for Mobile Communications*–. 3, 49, 50, 163
- HeNB** eNB Doméstico –*Home eNodeB*–. 12
- HetNet** Red Heterogénea –*Heterogeneous Network*–. 54, 129, 139
- HSDPA** Acceso de Paquetes de Alta Velocidad en enlace Descendente –*High Speed Downlink Packet Access*–. 6, 50
- HSPA** Acceso de Paquetes de Alta Velocidad –*High Speed Packet Access*–. 3, 5, 6, 49, 163
- HSS** Servidor de Usuarios Locales –*Home Subscriber Server*–. 19, 25
- HSUPA** Acceso de Paquetes de Alta Velocidad en enlace Ascendente –*High Speed Uplink Packet Access*–. 6, 50
- IMS** Subsistema Multimedia IP –*IP Multimedia Subsystem*–. 19
- LB** Balanceo de Carga –*Load Balancing*–. 55, 56, 57, 58, 62, 70, 76, 103, 104, 107, 130, 155, 163
- LRIC** *Bottom-UP Long Run Incremental Cost*–. 102
- LTE** *Long Term Evolution*. 3, 4, 5, 16, 19, 47, 49, 50, 81, 83, 86, 87, 89, 97, 102, 161
- MAPL** Máxima Pérdida de Propagación Permisible –*Maximum Allowable Path Loss*–. 43, 46, 145
- MBMS** Servicios Multimedia Broadcast-Multicast –*Multimedia Broadcast Multicast Services*–. 13
- MBSFN** *Multicast-Broadcast Single-Frequency Network*. 67

Lista de Acrónimos

- MCS** Técnica de Modulación y Codificación –*Modulation and Coding Scheme*–. 27, 29, 52, 89, 116
- ME** Equipo Móvil –*Mobile Equipment*–. 21
- MIMO** Múltiple Entrada Múltiple Salida –*Multiple-input Multiple-output*–. 6, 11, 52
- MME** Entidad de Gestión de Movilidad –*Mobility Management Entity*–. 19, 53
- MT** Terminación Móvil –*Mobile Termination*–. 21
- Multi-RAT** –*Multiple Radio Access Technologies*–. 49
- NUF** Función de Utilidad de Red –*Network Utility Function*–. 58, 60, 86, 89
- NUM** Maximización de la Utilidad de la Red –*Network Utility Maximization*–. 60, 62
- OFDM** Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales –*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*–. 11
- OFDMA** Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales –*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*–. 12, 30, 89
- OPEX** Gastos de Operación –*Operating expense*–. 4, 15, 161
- PCRF** Función de Políticas y Reglas de Tarificación –*Policy and Charging Rules Function*–. 19, 26
- P-GW** Puerta de enlace de Redes Públicas de Datos –*PDN GateWay*–. 19
- PA** Método Propuesto –*Proposed Approach*–. XII, 131, 133, 135, 136, 141, 146, 149
- PRB** Bloque de Recursos Físico –*Physical Resource Block*–. 30, 37
- PSO** Optimización por Enjambre de Partículas –*Particle Swarm Optimization*–. 68
- PWS** Sistema Público de Alertas –*Public Warning System*–. 12
- QoS** Calidad de Servicio –*Quality of Service*–. 4, 25, 102, 161
- R** Rural. XV, 46, 141
- RAN** Red de Acceso Radio –*Radio Access Network*–. 4, 50, 161

- RB** Bloque de Recursos –*Resource Block*–. 29, 50, 91
- RLB** Dimensionado de Enlace Radio –*Radio Link Budget*–. 43
- RNC** Controlador de Red Radio –*Radio Network Controller*–. 9
- RR** *Round Robin*–. 89
- RRM** Gestión de Recursos Radio –*Radio Resource Management*–. 27
- RSRP** Potencia de Señal Recibida de Referencia –*Reference Signal Received Power*–. 50, 57, 58
- RSRQ** Calidad de Señal Recibida de Referencia –*Reference Signal Received Quality*–. 50, 57
- RSSI** Indicador Intensidad de Señal Recibida –*Received Signal Strength Indicator*–. 50
- S-GW** Puerta de enlace de Servicio –*Serving GateWay*–. 19, 25
- SAE** Evolución de la Arquitectura del Sistema –*System Architecture Evolution*–. 11, 19
- SC-FDMA** Acceso Múltiple por División de Frecuencias con Portadora Única –*Single-Carrier Frequency Division Multiplexing Access*–. 12
- SGSN** Nodo de Soporte del Servicio GPRS –*Serving GPRS Support Node*–. 9
- SIM** Módulo de Identificación de Abonado –*Subscriber Identity Module*–. 21
- SINR** Relación Señal Ruido Interferencia –*Signal to Interference plus Noise Ratio*–. XI, 55, 56, 62, 70, 75, 76, 82, 83, 89, 97, 103, 116, 120, 132, 133, 163
- SMNTP** Herramienta de Planificación Estratégica de Red Móvil –*Strategic Mobile Network Planning Tool*–. 102
- SON** Redes Auto-Organizadas –*Self Organising Networks*–. 12
- SU** Suburbano –*Suburban*–. 45
- SUA** Asociación Única de Usuario –*Single User Association*–. 60, 61, 89, 131, 140
- TBS** Tamaño de Bloque de Transporte –*Transport Block Size*–. 29, 88, 116, 137

TDD Duplexado por División en el Tiempo –*Time Division Duplex*–. 12

TE Equipo Terminal –*Terminal Equipment*–. 21

TTI Intervalo de Tiempo de Transmisión –*Transmission Time Interval*–. 11, 29, 49, 88, 90, 91

U Urbano –*Urban*–. XII, XV, 45, 141, 142, 143

UCAP Problema de Asociación de Usuarios a Celdas –*User-Cell Association Problem*–. 16, 58, 70, 81, 84, 85, 86, 87, 130, 139, 162, 166

UDN “Red Ultra Densa” –*Ultra Dense Network*–. 54, 76, 87, 129, 139, 153

UE Equipo de Usuario –*User Equipment*–. 19, 53, 83, 89, 94

UEs Equipos de Usuario –*User Equipments*–. 3

UICC Tarjeta Universal de Circuito Integrado –*Universal Integrated Circuit Card*–. 21

UL Enlace Ascendente –*Uplink*–. 8, 47, 49

UMTS Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles –*Universal Mobile Telecommunications System*–. 5, 50

USIM Módulo de Identificación de Abonado Universal –*Universal Subscriber Identity Module*–. 21

VoIP Voz sobre IP –*Voice over IP*–. 19

WCDMA Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha –*Wideband Code Division Multiple Access*–. 3, 49

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado o definición
A	Coefficiente de pérdida de trayecto relacionado con la frecuencia
\mathcal{A}	Área de servicio
\mathbf{A}_j	Vector de asignación (de posibles eNBs) del usuario u_j
B	Coefficiente de pérdida de trayecto relacionado con la frecuencia
\mathcal{B}	$= \{B_1, \dots, B_{N_B}\}$, conjunto de eNBs
B_k	eNB número k
\mathcal{C}	Función de coste a minimizar
\mathbf{c}_i	Cromosoma número i
\mathcal{D}	Distribución estadística
DT_{B_k}	Tiempo de descarga en el k -ésimo eNB
$DT_{u_l \in B_k}$	Tiempo de descarga requerido por $u_l \in B_k$ (usuario u_l asociado a B_k)
Δ_{DTS}	Variación relativa de DTS (<i>Downlink Time of the complete System</i>)
f	Frecuencia portadora
$\mathcal{F}_{\text{size}}$	Tamaño del archivo a descargar
$\mathbf{\Gamma}$	Matriz de valores de CQI (<i>Channel Quality Indicator</i>)
γ^{S_i}	Fracción de usuarios son servicio S_i
h_{B_j}	Altura del eNB B_j
h_{u_i}	Altura del usuario u_i
I_{MCS}	Índice de MCS (<i>Modulation and Coding Scheme</i>)
i_{R,u_l}	Potencia interferente recibida por el usuario u_l
ℓ_{u_m, B_X}	Pérdida total en el enlace $B_X \rightarrow u_m$
L_{u_m, B_X}	Pérdida total (dB) en el enlace $B_X \rightarrow u_m$
$L_{l,z}^{\text{PM}}$	Pérdida de propagación (dB) dada por un Modelo de Propagación
L_{CLU}	Factor de corrección de pérdida dependiente del “clutter” (entorno)

(*Sigue en la página siguiente.*)

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado o definición
$\mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}}$	Cuota de mercado del operador
$\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$	Penetración en el mercado del servicio S_i
n	Potencia de ruido térmico
N_B	Número de eNB
N_U	Número de usuarios
N_{PRB}	Número de PRB (<i>Physical Resource Blocks</i>)
$N_{\text{RB}} = N_{\text{PRB}}$	Número de RBs (<i>Resource Blocks</i>)
$n_u^{B_k}$	Número de usuarios asignados al eNB B_k
\mathcal{O}_F	<i>Overload factor</i> (porcentaje de usuarios activos simultáneos)
p_{e,B_k}	Potencia emitida por el eNB B_k
p_{cross}	Probabilidad de cruce
p_{mut}	Probabilidad de mutación
$p_{R,B_k}(l)$	Potencia recibida en el eNB B_k emitida por el usuario u_l
p_{R,u_l}	Potencia de señal recibida por el usuario u_l
p_{sel}	Probabilidad de selección
$\mathcal{P}_{\text{size}}$	Tamaño de la población
Q	Orden de modulación
$R_{b,\text{Peak}}^{S_i}$	Velocidad de pico del servicio S_i
$R_{b,S}^{\text{DL}}(j)$	Tasa binaria de bajada del servicio S en el enlace j
$\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$	Densidad de población (habitantes/km ²) en un entorno “CLU”
$\rho_{A,U}^{S_i}$	Densidad de usuarios activos con servicio S_i
$\overline{\text{DTS}}$	Valor medio de DTS
$\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$	Reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$
$\xi_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$	Variación relativa de $\overline{\text{DTS}}$ con respecto del despliegue óptimo
N_B^{opt}	Número óptimo (mínimo) de eNB
P_R	Nivel de potencia recibida (dBm)
S	Sensibilidad del receptor (dBm)
$\sum_{\delta} L_{\delta}$	Suma de todas las pérdidas excepto las de propagación
$\sum_{\tau} G_{\tau}$	Suma de todas las ganancias
u_l	Usuario número l
\mathcal{T}	<i>Throughput</i> (bps)
T_{size}	Tamaño del torneo
$\mathcal{T}_{u_l \in B_k}$	Throughput (bps) del usuario u_l asignado al eNB B_k durante 1 TTI

(*Sigue en la página siguiente.*)

Símbolo	Significado o definición
\mathcal{U}	$= \{u_1, \dots, u_{N_U}\}$ o conjunto de N_U usuarios <i>activos</i>
Υ	Matriz de SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
Υ_{lk}	SINR entre el usuario u_l y la estación B_k
ς	Pendiente (modelo de dos pendientes)

Parte I

Motivación, objetivos, fundamentos y estado del arte

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Long Term Evolution (LTE) es la tecnología de acceso móvil que está experimentando un desarrollo más rápido en toda la historia de las comunicaciones móviles [1–3] y una de los motores que más fuertemente está impulsado el mercado de las telecomunicaciones móviles. A su vez, es uno de los factores más relevantes y dinámicos de nuestra economía globalizada [1, 4], contribuyendo a acelerar la innovación en otros mercados [1–3, 5, 6]. LTE ofrece prestaciones sin precedentes, destacando una velocidad muy elevada de datos y muy baja latencia en una gran variedad de aplicaciones y servicios diferentes [1, 7–9], especialmente en el Enlace Descendente –*Downlink*– (DL) [10–13]. Ésta es una de las razones por las que los usuarios de LTE han crecido a un ritmo muy elevado durante 2016, con 160 millones de nuevos subscriptores durante el cuarto trimestre de 2016, alcanzando un total de 1700 millones de usuarios en todo el mundo [1].

Para entender este vertiginoso crecimiento es conveniente revisar algunos aspectos a nivel global: las tecnologías de Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha –*Wideband Code Division Multiple Access*– (WCDMA) [14, 15] y LTE han sumado ≈ 60 millones de usuarios durante el tercer cuatrimestre de 2016, mientras que las subscripciones únicamente en el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles –*Global System for Mobile Communications*– (GSM) han *disminuido* en 100 millones [1] (a pesar que la mayor parte de usuarios de sistemas Tercera Generación –*Third Generation*– (3G) y de Cuarta Generación –*Forth Generation*– (4G) tienen acceso a GSM o bien al sistema de Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM –*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*– (EDGE), como red de respaldo [1]).

1. INTRODUCCIÓN

Hay otras razones por las que LTE es la tecnología móvil de mayor crecimiento [1]: los fabricantes de Equipos de Usuario –*User Equipments*– (UEs) han anunciado un crecimiento anual de aproximadamente un 80% durante 2016, siendo los *smartphones* los dispositivos preferidos por los usuarios (aproximadamente el 75% de todos los teléfonos móviles vendidos en Q3 2016) y uno de los impulsores del ya mencionado despliegue rápido de LTE. Por otra parte, con respecto a las propias redes, existen en todo el mundo 449 redes LTE desplegadas comercialmente en 157 países [1]. La gran aceptación de LTE está siendo impulsada por una *fuerte demanda*, tanto para mejorar la experiencia del usuario como por redes más rápidas que las proporcionadas por la tecnología de Acceso de Paquetes de Alta Velocidad –*High Speed Packet Access*– (HSPA) [16]. También hay comportamientos nuevos, especialmente los correspondientes a los adolescentes, que están cambiando las pautas de visualización de TV/vídeo, pasando desde la televisión convencional a la transmisión de vídeo en los teléfonos inteligentes [1].

Todos estos factores combinados están impulsando una creciente demanda de nuevos servicios con mayor necesidad de descarga de datos (tales como TV, vídeo bajo demanda o juegos). En particular, el tráfico de datos ha crecido un 75% durante el último año [1], mientras que el estudio [2] predice la existencia de unos 4100 millones de usuarios LTE para el final de 2021.

Las cifras antes mencionadas motivan la relevancia técnica y económica de LTE para los operadores móviles. Sin embargo, aunque el gran aumento de tráfico es una buena noticia para los operadores móviles, la contrapartida negativa es que los ingresos *no* suben al mismo ritmo [1]. Esto conduce a un aumento del *gap* entre el tráfico (que evoluciona exponencialmente en el tiempo) y los ingresos (que crecen a un ritmo mucho más lento que el tráfico debido a la competencia entre los operadores). Con el objetivo de conseguir márgenes de beneficios razonables, los operadores tienen como objetivo la optimización de las inversiones, preservando la Calidad de Servicio –*Quality of Service*– (QoS), a través de una estrategia doble: (1) la selección de la mejor tecnología disponible, y (2) la optimización del despliegue de los equipos de red. En concreto, la optimización de la Red de Acceso Radio –*Radio Access Network*– (RAN) –el conjunto Subsistema de Estación Base –*Base Station Subsystem*– (BSS) o eNB en LTE– es crucial, ya que representa aproximadamente un 60% de la inversión total, e, incluso, un porcentaje más elevado de los Gastos de Operación –*Operating expense*– (OPEX) [17, 18].

Debido al mencionado *gap*, los operadores móviles necesitan *redefinir su modelo* de negocio para hacerlo sostenible en el tiempo. La razón subyacente se encuentra en que se está produciendo una ralentización del crecimiento de los ingresos [1]. Una de las causas se encuentra en que la demanda de servicios de comunicación basados en

1.2 Comunicaciones móviles: contexto actual y reciente

IP, como WhatsApp, Facebook Messenger o Skype, se están haciendo enormemente populares y, de hecho se espera que ganen aún mayor importancia. Sin embargo, los servicios *over-the-top* reportan muy pocos beneficios a los operadores móviles. Esta es precisamente una de las razones por las que los operadores tienen que encontrar un nuevo modelo de negocio que permita integrar tales servicios y aumentar sus beneficios. Esto es aún más importante en un contexto en el cual, por un lado, los operadores necesitan financiación para el despliegue de nuevas redes LTE mientras que, por otro, sus servicios convencionales están bajo fuerte presión. Estos fenómenos, junto con problemas de regulación y de fuerte competencia, está produciendo una ralentización del crecimiento de los ingresos [1].

Una forma de mitigar estos efectos es realizar una mejor planificación. En este aspecto, el *objetivo* de esta Tesis consiste en el diseño, implementación y prueba de algoritmos, tanto *convencionales* –utilizados actualmente en la industria– como otros basados en *Computación Evolutiva*, que constituyan una contribución novedosa a la *planificación sistémica* de redes móviles 4G, y en particular, de las redes LTE.

La planificación de las redes LTE exhibe una gran *complejidad* que, como se verá en la revisión bibliográfica del Capítulo 3, es objeto de intensa investigación. Tal complejidad hace que el análisis objetivo de la planificación, optimización y rendimiento de una red LTE requiera entornos de simulación que implementen algoritmos novedosos. Como se verá en la Sección 3.2, estos simuladores, en la mayoría de los casos, son específicos de fabricante o comerciales, además de ser entornos cerrados, por lo que se dificulta su uso por parte de la comunidad académica.

Con el objetivo de comprender mejor qué estrategias emplean los operadores para conseguir estos objetivos, resulta interesante destacar algunos aspectos de la situación actual debida a la reciente evolución (última década) de las tecnologías móviles.

1.2 Comunicaciones móviles: contexto actual y reciente

La última década ha sido testigo de una mejora sustancial en el rendimiento de las tecnologías móviles de banda ancha. Con la creciente demanda por parte de los usuarios de aplicaciones de datos multimedia e Internet móvil, la mejora de la calidad y el aumento de la capacidad de las redes inalámbricas se han convertido en una prioridad para las organizaciones de desarrollo de estándares como *Third Generation Partnership Project*– (3GPP).

Como respuesta a tales demandas, 3GPP inició los trabajos sobre LTE a finales de 2004. Con esta tecnología se abre una línea paralela a la familia de estándares del Sis-

1. INTRODUCCIÓN

tema Universal de Telecomunicaciones Móviles –*Universal Mobile Telecommunications System*– (UMTS), pasando de sistemas soportados sobre redes de conmutación de circuitos (voz) y paquetes (datos) a un ámbito Todo IP (Full-IP or All-IP). De esta manera, por un lado, se favorece el rápido crecimiento de los sistemas 4G (LTE y LTE-Advanced) y, por otro, se permite la evolución de los sistemas 3G (HSPA, HSPA+).

La Figura 1.1 representa la evolución de los estándares 3GPP durante la pasada década, junto con sus principales características y fecha de conclusión de cada especificación (se ha incluido Release-5 por ser el inicio de HSDPA).

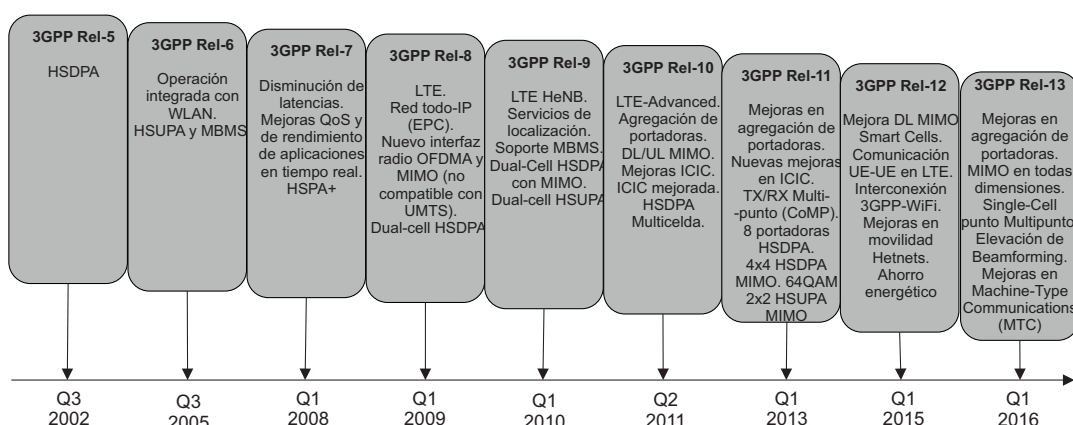


Figura 1.1: Evolución de los estándares 3GPP durante la última década, junto con sus principales características y/o novedades. (Fuente: elaboración propia).

Los estándares de 3GPP han ido evolucionando continuamente hacia un mayor rendimiento y velocidad de descarga y hacia menores latencias. Debido a ello, para conseguir mayores velocidades, tanto en enlace descendente como en el ascendente, los operadores 3G han evolucionado sus redes hacia el sistema Acceso de Paquetes de Alta Velocidad en enlace Descendente –*High Speed Downlink Packet Access*– (HSDPA), que se especificó en la Release-5 del 3GPP, y, posteriormente, hacia Acceso de Paquetes de Alta Velocidad en enlace Ascendente –*High Speed Uplink Packet Access*– (HSUPA), especificada en Release-6. HSDPA y HSUPA se conocen en conjunto como HSPA. HSPA se continuó desarrollando en Release-7 y Release-8 con otras características adicionales como, por ejemplo, mayores ordenes de modulación tanto en el enlace descendente como en el ascendente, técnicas Múltiple Entrada Múltiple Salida –*Multiple-input Multiple-*

output- (MIMO), mejoras en los protocolos de nivel de enlace de datos, o conectividad continua para los usuarios de datos (Always-on) [19, 20], por citar algunas de las más relevantes.

Con Release-8 se comenzó la especificación de LTE y el Núcleo de Paquetes Evolucionado –*Evolved Packet Core*– (EPC), que se terminaron de completar en 2008. A partir de entonces, además de continuar desarrollando tanto HSPA como LTE, 3GPP trabajó en el desarrollo de una especificación avanzada dirigida hacia 4G. Con este trabajo se llegó a LTE-Advanced, como parte de la Release-10, completada a mitad de 2011. Release-11, cerrada a principios de 2013, introdujo nuevas características como transmisión coordinada multipunto, agregación de portadoras mejorada y mejoras en la coordinación de interferencias entre celdas. Release-12 y Release-13 continúan la evolución de LTE-Advanced, completándose esta última en Marzo de 2016. Desde Septiembre de 2014 3GPP está inmerso en su Release-14.

Como se ha indicado con anterioridad, durante la última década, se han mantenido dos líneas *paralelas* en cuanto a evolución de los sistemas de comunicación móvil, diferenciándose dentro de la misma release del 3GPP entre HSPA y LTE, y compartiendo muchas de las soluciones técnicas en la evolución de ambas tecnologías.

Con el objetivo de comprender mejor éstas, los siguientes sub-apartados describen muy brevemente el proceso evolutivo y las principales mejoras introducidas por HSPA y LTE.

1.2.1 Evolución de HSPA-HSPA+

Debido a la demanda de mayores tasas de transferencia de datos junto con una mayor calidad de servicio, UMTS continuó su evolución más allá de las especificaciones iniciales de HSDPA (Rel-5) y HSUPA (Rel-6). En este aspecto, fueron tres las direcciones principales que se siguieron para guiar esta evolución [21]:

- Modulaciones de mayor orden.
- Técnicas avanzadas de antenas múltiples.
- Operación multiportadora.

En Release-7, se añadieron nuevas funcionalidades, además de aumentar las tasas de transferencia de datos. A esta evolución de HSPA se la conoce habitualmente como HSPA+. El objetivo principal en la evolución de HSPA es explotar tecnologías radio disponibles para maximizar el rendimiento del acceso radio. Esta evolución *extiende la*

1. INTRODUCCIÓN

vida útil de las inversiones en infraestructuras del operador de forma considerable, lo que es muy importante en un entorno de *fuerte competencia*. La consecución de este objetivo con HSPA+ se fundamenta principalmente en [19, 22–24]:

- Proporcionar interconexión flexible entre HSPA+ y LTE, lo que facilita la operación de ambas tecnologías.
- Permitir el funcionamiento en modo de paquetes para voz y datos.
- Ser compatible con los sistemas anteriores.

En cuanto a la evolución de HSPA, a partir de Release-7 (HSPA+), continúa hasta Release-12 encontrándose entre las funcionalidades introducidas más destacables las siguientes [16]:

- Receptores avanzados: 3GPP ha especificado diseños de receptores avanzados entre los que se pueden encontrar los siguientes. Tipo 1, con diversidad en recepción, Tipo 2, que emplean ecualización de canal y Tipo 3 que combina las dos funciones anteriores y cancelación de interferencias. Esta mejora es atractiva porque *no* implica cambios en la red.
- MIMO: emplea múltiples antenas de transmisión y múltiples antenas de recepción [25]. El uso más común se aplica a la multiplexación espacial. El transmisor envía diferentes flujos de datos sobre cada antena.
- “Conectividad de paquetes continua” –*Continuous Packet Connectivity*– (CPC): reduce la interferencia en el enlace ascendente creada por los canales de control dedicados de los usuarios cuando éstos no tienen datos que transmitir. CPC permite transmisión discontinua en el Enlace Ascendente –*Uplink*– (UL) y recepción discontinua en DL, dónde se puede apagar el receptor después de un cierto periodo de inactividad. CPC es especialmente útil en VoIP debido a que se puede desactivar el interfaz radio entre paquetes de VoIP.
- Modulaciones de orden superior: HSPA usa 16QAM en enlace descendente y QPSK en enlace ascendente, mientras que HSPA+ utiliza 64QAM en el enlace descendente y 16QAM en el enlace ascendente. En Release-11, se introduce 64QAM en el enlace ascendente.
- Multiportadora: en Release-8 se incorpora doble portadora adyacente en HSPA. Esto conlleva poder conseguir mayores tasas de datos. En Release-9 se permite

1.2 Comunicaciones móviles: contexto actual y reciente

la operación con doble portadora, en combinación con MIMO y sin la necesidad de que éstas sean adyacentes. También soporta operación con doble portadora en UL. En Release-10 se especifica el uso de hasta 4 canales, lo que resulta en un incremento considerable de la tasa de datos (hasta 168 Mbps). Finalmente, en Release-11, se soportan hasta 8 radiocanales en DL, doblando el *throughput* hasta los 336 Mbps.

- DL Multiflow Transmission. En Release-11 se define el medio por el que dos celdas pueden transmitir a un terminal móvil a la misma vez. Las dos celdas pueden transmitir datos independientes.

A modo de resumen de los aspectos mencionados anteriormente, la Tabla 1.1 representa el impacto de las distintas mejoras en las tasas de transferencia de datos.

Tabla 1.1: Mejoras de HSPA+ e impacto en la velocidad de transferencia de datos, tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente.

Mejora	Release	Tasa de transferencia de datos pico (Mbps) en enlace descendente	Tasa de transferencia de datos pico (Mbps) en enlace ascendente
HSPA en Rel-6	Rel-6	14.4	5.76
HSPA+ DL 64QAM, UL 16 QAM, 5 + 5 MHz	Rel-7	21.1	11.5
HSPA+ 2 × 2 MIMO, UL Y UL 16QAM, 5 + 5 MHz	Rel-7	28	11.5
HSPA+ 2 × 2 MIMO, DL 64QAM, UL 16QAM, 5 + 5 MHz	Rel-8	42.2	11.5
HSPA+ (no MIMO), Dual Carrier, 10 + 5 MHz	Rel-8	42.2	11.5
HSPA+ 2 × 2 MIMO Dual Carrier DL y UL 10 + 10 MHz	Rel-9	84	23
HSPA+ 2 × 2 MIMO Quad Carrier DL, Dual Carrier UL, 20 + 10 MHz	Rel-10	168	23
HSPA+ 2 × 2 MIMO, 8 Carrier DL, Dual Carrier UL 40 + 10 MHz	Rel-11	336	69

1. INTRODUCCIÓN

Otro aspecto importante en la evolución de HSPA/HSPA+ es el referente a la evolución de su *arquitectura de red*. Si se parte de Release-6, intervienen 4 elementos en el plano de usuario y control: Estación Base (Nodo B), Controlador de Red Radio –*Radio Network Controller*– (RNC), Nodo de Soporte del Servicio GPRS –*Serving GPRS Support Node*– (SGSN) y Nodo de Soporte de Pasarela GPRS –*Serving GPRS Support Node*– (GGSN). La evolución de la arquitectura se ha ido simplificando hasta converger con la arquitectura de LTE en Release-8, como aparece ilustrado en la Figura 1.2. Esta simplificación permite reducir las latencias de red y así mejorar el rendimiento total de los servicios IP. Como se observa en la Figura 1.2, la arquitectura de HSPA en Rel-7 coincide exactamente con la que usa LTE en Rel-8, con el Nodo B siendo responsable de la gestión de la movilidad, cifrado, retransmisiones y compresión de cabeceras, de la misma forma que lo es el eNB en LTE.

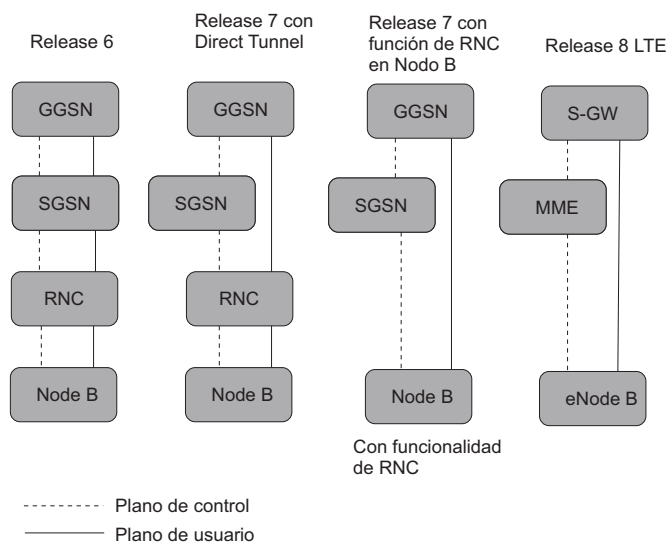


Figura 1.2: Esquema simplificado representando la evolución hacia una arquitectura simplificada. (Fuente: elaboración propia)

Con la funcionalidad de “Direct-Tunnel” se permite transportar el tráfico de usuario directamente desde la RNC al GGSN sin pasar por el SGSN. Si, además, las funcionalidades de la RNC recaen sobre el Nodo B (Rel-7), solamente intervienen dos nodos en la operación del plano de usuario (Nodo B y GGSN). De esta forma se consigue una mayor flexibilidad en cuanto a la escalabilidad del sistema y permite que la introducción de mayores velocidades –debido a la evolución de HSPA– tenga un impacto mínimo en

otros elementos de red, evitando crear “cuellos de botella”. Además, como el S-GW de LTE tienen funcionalidades similares al GGSN en HSPA, los desarrollos que se han ido realizando en torno a estos elementos del núcleo de la red han sido compartidos entre ambas tecnologías, debido a que las dos procesan los datos del plano de usuario y están conectados directamente a la estación base (NodoB/eNodoB) así como a elementos similares del plano de control.

1.2.2 Evolución de LTE-LTE Advanced

Aunque HSPA y HSPA+ ofrecen un servicio de banda ancha altamente eficiente y que perdurará durante años, 3GPP especificó LTE como parte de su Release-8. La evolución de los sistemas 3G en 4G viene impulsada por la creación y desarrollo de nuevos servicios para dispositivos móviles que requieren alta tasa de transferencia de datos y de QoS, y está habilitada por el avance de la tecnología disponible para los sistemas móviles. Específicamente [26–28]:

- LTE se desarrolla en canales radioeléctricos más amplios (hasta 20 MHz), con el consiguiente aumento de la velocidad de transferencia de datos pico.
- Desarrollo MIMO más simple. Debido a los avances en el campo de antenas, LTE facilita el desarrollo de MIMO [27, 29].
- Mejor rendimiento en latencias. Hay aplicaciones para las que la baja latencia es tan importante como un caudal alto. Con un bajo valor del parámetro Intervalo de Tiempo de Transmisión –*Transmission Time Interval*– (TTI) de 1 ms y una arquitectura simplificada (menos nodos en el núcleo de la red), LTE tiene la latencia mas baja del resto de tecnologías celulares.

3GPP empezó a trabajar en dos proyectos en paralelo en Realease 8: LTE y Evolución de la Arquitectura del Sistema –*System Architecture Evolution*– (SAE), los cuales definen la *red de acceso radio y el núcleo de red* del sistema. Los principales parámetros de diseño del acceso radioeléctrico se basan en el uso de: 1) Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales –*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*– (OFDM), para evitar interferencia entre símbolos; y 2) técnicas MIMO para aumentar las velocidades de transferencia de datos. A nivel de red, el aspecto principal es una

1. INTRODUCCIÓN

arquitectura de red IP completa (All-IP) que soporta QoS y que está diseñada para transmitir voz en el dominio de paquetes.

A este respecto, las principales mejoras introducidas en Release-8 han sido las siguientes [30]:

- Aumento en la velocidad de transferencia de datos, llegando a valores de 300 Mbps en enlace descendente y hasta 75 Mbps en enlace ascendente, usando 4×4 MIMO y un ancho de banda de 20 MHz.
- Ancho de banda del sistema *escalable*, soportando valores de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. Esto beneficia el desarrollo de distintos escenarios.
- Alta eficiencia espectral.
- Arquitectura del sistema simplificada, lo cual repercute en menores latencias, llegando a valores inferiores a 10 ms.
- Empleo de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales –*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*– (OFDMA) en enlace descendente y Acceso Múltiple por División de Frecuencias con Portadora Única –*Single-Carrier Frequency Division Multiplexing Access*– (SC-FDMA) en el ascendente.
- Técnicas MIMO.
- Soporta tanto Duplexado por División de Frecuencia –*Frequency Division Duplex*– (FDD) como Duplexado por División en el Tiempo –*Time Division Duplex*– (TDD).

La evolución de LTE ha continuado con Release-9, versión que mejora una serie de características introducidas en la versión 8, además de presentar nuevos avances tanto en la arquitectura de red como en nuevas características de servicio. De forma resumida, éstas incluyen [30]:

- Sistema Público de Alertas –*Public Warning System*– (PWS): recepción de alertas por desastres naturales u otras situaciones críticas.
- Introducción de Femto-celdas bajo la forma de eNB Doméstico –*Home eNodeB*– (HeNB) [31].
- Multi-Layer Beamforming: aumenta el throughput dirigiendo el haz radio hacia la posición estimada del usuario por el eNB.

1.2 Comunicaciones móviles: contexto actual y reciente

- Redes Auto-Organizadas –*Self Organising Networks*– (SON): permite la autoinstalación, optimización y reparación de la red permitiendo la reducción del trabajo manual y su coste asociado [32].
- Servicios Multimedia Broadcast-Multicast Evolucionados –*Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services*– (eMBMS): se mejora el canal Servicios Multimedia Broadcast-Multicast –*Multimedia Broadcast Multicast Services*– (MBMS) desde la perspectiva de incremento de tasa de datos y capacidad.
- Posicionamiento: mejora la exactitud de la localización de usuarios.

Con la Release-10 aparece LTE-Advanced [27, 33], el cual ha continuado su desarrollo en especificaciones siguientes. Igualmente que para el caso de tecnologías previas, LTE-Advanced tiene mejoras en 3 áreas: tasa de datos (pico y media), eficiencia espectral y latencia, tanto en el plano de *usuario* como de *control*. Para ello se han mejorado algunas características de LTE, mientras que otras son nuevas en las distintas especificaciones a partir de Release-10. Entre las principales se encuentran las siguientes [27]:

- Agregación de Portadoras. Se permite la agregación de hasta 5 portadoras de hasta 20 MHz cada una, de manera que se obtenga un ancho de banda de transmisión de hasta 100 MHz. Además, estas portadoras no tienen que ser contiguas sino que pueden pertenecer a bloques de frecuencia diferentes. De cara a compatibilidad con LTE, cada una de estas portadoras se puede configurar como en Release-8.
- Mejoras en técnicas MIMO. Se permite configuraciones de hasta 8×8 en el enlace descendente y hasta 4×4 en el ascendente, para un único usuario. Mediante estas técnicas se consigue otro de los objetivos de LTE-Advanced: la mejora de la eficiencia espectral.
- Transmisión Multipunto Coordinada –*Coordinated Multipoint*– (CoMP). Con esta técnica se consigue mejorar: la *cobertura* a altas velocidades binarias, el régimen binario en el borde de la celda y el régimen binario del sistema.
- Redes auto-optimizadas.
- Soporta Redes Heterogéneas, Heterogeneous Networks (HetNets). Redes que combinan macro-celdas con micro-celdas [34].

1. INTRODUCCIÓN

- Coordinación Optimizada de Interferencia Inter-Celda –*Enhanced Inter-Cell Interference Coordination*– (eICIC). Mediante esta técnica se mitiga la interferencia sobre canales de usuario y control en HetNet.

La evolución de LTE-Advanced continúa en la actualidad. A este respecto, la Figura 1.3 representa la progresión en cuanto a las velocidades en DL y tecnología aplicada desde el inicio de las comunicaciones móviles en la década de los 80 [28].

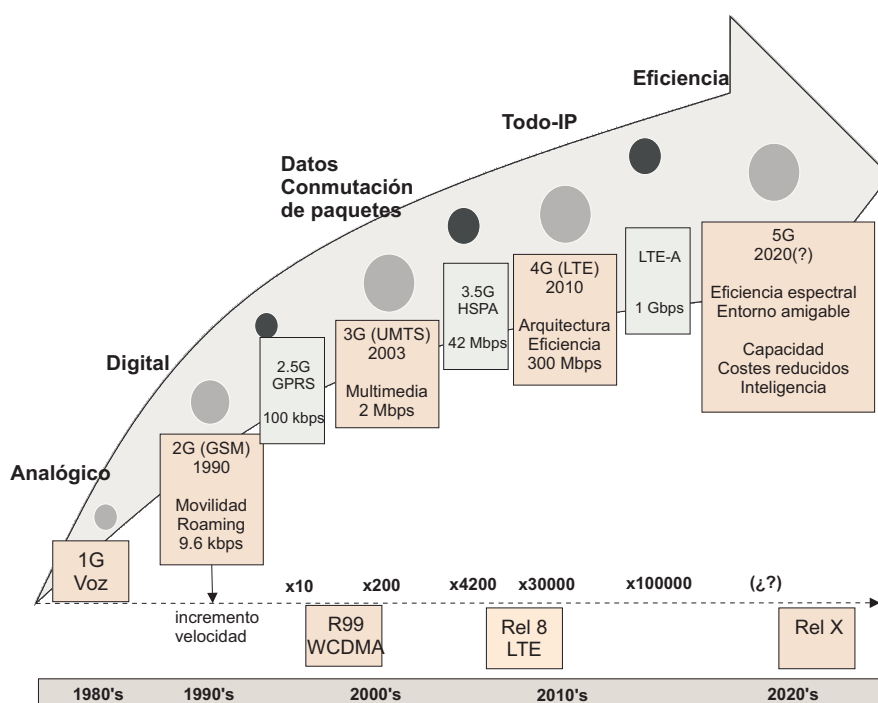


Figura 1.3: Evolución de las comunicaciones móviles desde década de los 80 a la actualidad, ilustrando las principales tecnologías y velocidades binarias. (Fuente: elaboración propia a partir de [28]).

Una vez que se ha resumido la situación actual, dentro del contexto reciente de los diez últimos años, un aspecto de esencial importancia que se hace necesario introducir, antes de entrar en detalles más específicos, es el *dimensionamiento* de una red LTE.

1.3 Dimensionamiento de red LTE: una introducción

Con el objetivo de comprender mejor la introducción de esta tesis, en esta sección se presenta una breve descripción conceptual de la fase de dimensionamiento de una red LTE genérica. No obstante, este proceso será detallado con más profundidad en la Sección 3.1.

El principal *objetivo* del proceso de dimensionamiento es garantizar las necesidades de cobertura, capacidad, calidad y coste. El diseñador de la red tiene que tener en cuenta estos factores durante la fase de planificación de red. Los objetivos de cobertura deben ser seleccionados de una manera inteligente para satisfacer los objetivos de negocio con el requisito mínimo de gasto (y calidad aceptable). Por otro lado, la red debe dimensionarse adecuadamente para cumplir con el requisito de capacidad actual y futura, sin subestimar o sobreestimar el crecimiento del tráfico. Como se describirá en la Sección 3.1, tanto el dimensionado como el despliegue de una red LTE pasa por una serie de fases, cada una con unas funciones determinadas que, de forma resumida, abarcan los siguientes aspectos [10, 27]:

- Identificación de los requisitos de cobertura y capacidad. Para ello se tienen en cuenta diferentes perfiles de tráfico, el régimen binario en el borde de la celda y la calidad de servicio necesaria. Además se selecciona el modelo de propagación en función del tipo de entorno sobre el que se han de realizar los cálculos [35].
- Obtención de la ubicación y del número de eNB necesarios para poder satisfacer los requisitos anteriores.
- En base a estimaciones de tráfico y los recursos disponibles, y de acuerdo al número y tipo de eNB, se realiza el cálculo de los enlaces necesarios, tanto en la red de acceso como hacia el núcleo de la red [10].

Todos estos valores tienen que ser contrastados una vez realizados los cálculos preliminares. Para ello es fundamental el empleo de herramientas software que realizan la función de *simulador* de red LTE. Se introducen al sistema parámetros de entrada característicos del eNB (altura, potencias de transmisión y recepción, tipos de antena, número de sectores, inclinación, . . .), parámetros de servicio (valores característicos de servicios ofertados, como por ejemplo su régimen binario mínimo) y parámetros generales del sistema LTE (frecuencia portadora, ancho de banda del sistema, probabilidad de cobertura, tipo de entorno, etc.). Por último, la planificación finaliza con pruebas de campo que ayuden a validar o bien corregir las simulaciones realizadas con anterioridad.

1.4 Objetivo y estructura de la Memoria de Tesis Doctoral

El *objetivo* principal de esta Tesis Doctoral es contribuir al dimensionamiento estratégico de la red de acceso, e-UTRAN, de una red LTE. El motivo por el que se centra en la red de acceso se encuentra en que la optimización de ésta es crucial debido a que constituye aproximadamente el 60% de la inversión total, e incluso una parte más elevada de los gastos OPEX.

En concreto, se ha diseñado una *herramienta de planificación estratégica* de una red LTE, centrada en el proceso de *dimensionado* de red en un entorno *multi-usuario* y *multi-servicio*. Un aspecto importante en este proceso consiste en el proceso de *asignación de usuarios a eNBs*. Como se verá, éste es un problema complejo que en esta tesis se ha abordado utilizando un EA. El resultado de esta investigación se ha publicado en [36]. Este EA se ha integrado en la herramienta de planificación estratégica como un módulo de ésta.

Con todas estas ideas en mente, la presente Memoria de Tesis Doctoral queda estructurada en tres partes:

- **Parte I. Fundamentos, estado del arte y objetivos detallados.**

Una vez introducidos los aspectos básicos de LTE en el Capítulo 2, que servirán como fundamento teórico de esta tesis, el Capítulo 3 se centra en realizar una *revisión bibliográfica* de:

- Dimensionamiento de red LTE. Tras analizar sus aspectos esenciales e introducir, por claridad, un conjunto de conceptos que se utilizarán a lo largo de este tesis, discute los trabajos existentes relacionados.
- Herramientas de planificación de red. Como se verá, la planificación de redes LTE es un proceso muy complejo que requiere herramientas software altamente especializadas. Esta sección se centra exclusivamente en la revisión de las herramientas de planificación existentes, tanto en el ámbito comercial como en el del software libre. La conclusión de tal revisión es que se precisa de una herramienta nueva y flexible que permita investigar aspectos que las herramientas existentes no permiten. Esta es una de las causas que motiva la investigación realizada en esta tesis.
- Problema de Asociación de Usuarios a Celdas –*User-Cell Association Problem*– (UCAP). Se realiza una profunda revisión bibliográfica de las diferentes técnicas de asignación de usuarios a nodos, tanto las utilizadas en la industria, como las propuestas por el mundo académico, cuyos enfoques son, como

se verá, muy distintos. La conclusión es que el planteamiento que se propone en esta tesis, publicado en [36], es novedoso.

- Algoritmos Evolutivos. En esta tesis se propone la resolución aproximada del problema de asociación de usuarios a eNBs mediante un EA, cuyos resultados se han publicado en [36]. Se resumen los principales estudios realizados sobre la aplicación de EAs a redes móviles LTE, llegando a la conclusión de que la propuesta de esta tesis es novedosa.

Gracias a las conclusiones extraídas de los capítulos previos (aspectos técnicos de LTE –Capítulo 2– y revisión bibliográfica –Capítulo 3–), en el Capítulo 4 se está ya en condiciones de *delimitar de forma específica los objetivos y contribuciones* de la presente tesis, cuya descripción y discusión pormenorizada se realiza en la siguiente parte de la Memoria de Tesis Doctoral.

- **Parte II. Contribuciones y resultados numéricos.** Esta segunda parte de la Memoria de Tesis Doctoral se centra en la descripción y aplicación del EA utilizado para la asignación cuasi-óptima de usuarios a eNB mediante la minimización de una novedosa función de coste, llamada “Tiempo de descarga total del sistema” –*Download Time of the complete System*– (DTS), que hemos propuesto en [36]. Además detalla la herramienta de planificación LTE diseñada y muestra el análisis de los resultados obtenidos mediante simulaciones en este marco. En concreto:
 - En el Capítulo 5 se describe tanto el planteamiento novedoso del problema de asociación de usuarios a eNBs en LTE (basado en la minimización de la métrica DTS) como su resolución mediante un EA adaptado al problema. Se detalla su implementación y se estudia su aplicación en diferentes entornos (denso urbano, urbano y rural). Igualmente se analiza el impacto sobre el tiempo de descarga total del sistema al aumentar o reducir el número de eNBs.
 - En el Capítulo 6 se describe la implementación de la herramienta global de planificación LTE, que incluye, como un módulo específico, al EA anterior. Se muestran los puntos principales de la herramienta diseñada e implementada en MATLAB. Mediante ésta se pueden realizar comparativas en función de entorno, número y distribución de eNB, densidad y distribución de usuarios y técnicas de programación de recursos (*scheduling*).
 - El Capítulo 7 describe el trabajo de simulación realizado y los resultados obtenidos. Se han realizado experimentos tendentes a evaluar el funciona-

1. INTRODUCCIÓN

miento de la herramienta de dimensionado desarrollada. En particular, los resultados de los experimentos de simulación realizados para solucionar el problema de asociación de usuarios a eNBs mediante un EA ha sido publicado en [36].

- **Parte III. Conclusiones y líneas de trabajo futuro.** Esta última parte de la tesis está constituida por las conclusiones de la investigación realizada junto con las posibles líneas de investigación futuras (Capítulo 8) y concluye, finalmente, con las publicaciones generadas durante el proceso de investigación.

Capítulo 2

Revisión de aspectos fundamentales de LTE

Para conseguir el objetivo general de la Tesis, introducido en el Capítulo 1, resulta importante revisar ciertos aspectos fundamentales relacionados con la gestión de los recursos radio de las redes LTE que, como se ha avanzado en la Sección 1.1, es la parte de la red más costosa para el operador. En el presente capítulo se ponen en contexto los aspectos más importantes de la arquitectura (Sección 2.1) y de la gestión de los recursos radio disponibles (Sección 2.2).

2.1 Arquitectura de red LTE

LTE abarca tanto la evolución de la red de acceso radio *Evolved UMTS RAN*–(e-UTRAN) como una evolución de aspectos, que no pertenecen al ámbito de radiocomunicaciones, bajo el término SAE, el cual incluye EPC [13].

La Figura 2.1 representa la arquitectura de alto nivel del Sistema de Paquetes Evolucionado –*Evolved Packet System*– (EPS) con los interfaces estandarizados entre los distintos elementos [37]. Equipo de Usuario –*User Equipment*– (UE), e-UTRAN y SAE, en su conjunto, conforman EPS.

Una de las principales funciones de EPS es proporcionar conectividad IP, de forma que los UE se puedan comunicar con redes de datos, como pueden ser Internet, redes privadas o Subsistema Multimedia IP –*IP Multimedia Subsystem*– (IMS), y proporcionar así servicios como Voz sobre IP –*Voice over IP*– (VoIP). Además se debe garantizar la seguridad, privacidad y calidades de servicio demandadas por los usuarios finales. Para ello intervienen varios elementos de red, los cuales tienen diferentes roles y entre los

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

que destacamos eNB, Entidad de Gestión de Movilidad –*Mobility Management Entity*– (MME), Puerta de enlace de Servicio –*Serving GateWay*– (S-GW), Puerta de enlace de Redes Públicas de Datos –*PDN GateWay*– (P-GW), Función de Políticas y Reglas de Tarificación –*Policy and Charging Rules Function*– (PCRF) y Servidor de Usuarios Locales –*Home Subscriber Server*– (HSS). En la Figura 2.2 se muestra mayor nivel de detalle de la arquitectura de EPS.

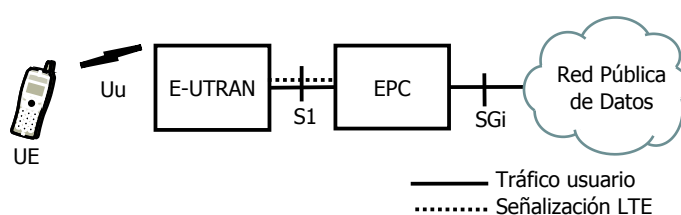


Figura 2.1: Arquitectura de alto nivel de EPS. (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).

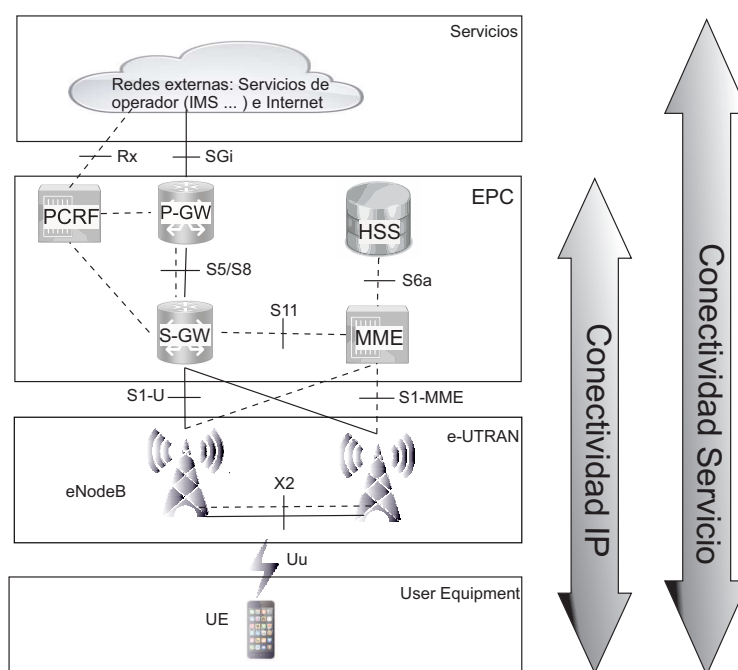


Figura 2.2: Arquitectura EPS. (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).

El desarrollo de e-UTRAN se concentra en un único nodo denominado eNB, el cual aglutina todas las funcionalidades radioeléctricas y es la terminación de todos los protocolos de la parte radio. E-UTRAN no es más que un conjunto de eNB conectados mediante el interfaz X2 [38]. En cuanto a EPC, uno de los grandes cambios de arquitectura en el Núcleo de Red es que desaparece el entorno de conmutación de circuitos quedando solamente el núcleo de conmutación de paquetes. Las funciones, equipos y arquitectura de EPC se pueden considerar totalmente nuevos [38], si bien parte de la evolución ha consistido en nuevas versiones SW sobre los equipos del Núcleo de Paquetes anterior. EPC está formado por varios nodos, cada uno de los cuales se interconecta por medio de interfaces que han sido estandarizados por 3GPP de manera que se permita la inter-operabilidad multi-fabricante (Figura 2.2).

UE, eUTRAN y EPC se describen con más detalle en los siguientes subapartados.

2.1.1 Equipamiento de usuario

Se entiende por UE el dispositivo que el usuario final utiliza para el desarrollo de su servicio de comunicación. Estos dispositivos pueden ser desde un teléfono inteligente hasta tarjetas de comunicaciones insertadas, por ejemplo, en ordenadores portátiles. La Figura 2.3 muestra la arquitectura del UE [39].

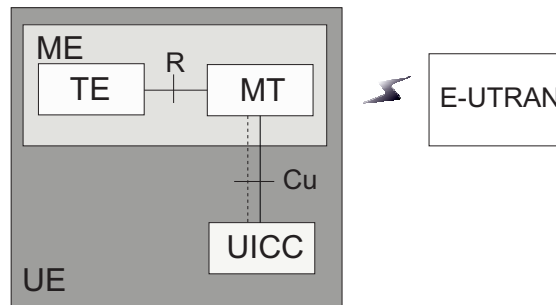


Figura 2.3: Arquitectura UE (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).

El dispositivo de comunicaciones se denomina Equipo Móvil –*Mobile Equipment*– (ME). En el caso de un teléfono móvil, ME es el propio dispositivo. Pero se dan casos donde ME está dividido en dos componentes, llamados Terminación Móvil –*Mobile Termination*– (MT), que controla las funciones de comunicación, y el Equipo Terminal –*Terminal Equipment*– (TE), que termina los flujos de datos. En el caso de un ordenador

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

portátil, MT sería una tarjeta LTE y el TE sería el propio ordenador. Además también forma parte del UE una tarjeta inteligente llamada Tarjeta Universal de Circuito Integrado –*Universal Integrated Circuit Card*– (UICC), llamada comúnmente tarjeta Módulo de Identificación de Abonado –*Subscriber Identity Module*– (SIM). Esta tarjeta almacena datos de usuario y además ejecuta una aplicación conocida como Módulo de Identificación de Abonado Universal –*Universal Subscriber Identity Module*– (USIM). Esta aplicación se usa para identificar y autenticar al usuario y para crear claves de seguridad de cara a proteger la transmisión por el interfaz radio.

A nivel funcional, el UE es un dispositivo para la comunicación de aplicaciones, el cual, mediante un protocolo de señalización con la red, establece, mantiene y finaliza los enlaces de comunicaciones necesarios para dicho fin. En estas funciones se incluyen específicamente las de gestión de movilidad, como pueden ser traspasos entre celdas o reporte de localización del terminal [38]. LTE soporta UEs que usen IPv4, IPv6 o “dual stack” IPv4/v6. Un UE recibirá una dirección IP para cada red de datos con la que se comunique, por ejemplo, una para Internet y otra para una red privada.

Los dispositivos móviles tienen una gran variedad de capacidades desde el punto de vista de funcionalidades y parámetros del sistema LTE soportados [40]. Éstas abarcan valores como tasa máxima de transferencia de datos que puede soportar el terminal, tipos de tecnología radio admitidas, frecuencias sobre las que pueden operar, protocolo IP sobre el que trabaja (IPv4, IPv6 o “dual stack”), y se transmiten a la e-UTRAN por medio de mensajes de señalización. De esta forma la red puede conocer cómo tiene que comunicarse con el terminal. Los mensajes utilizados para esta comunicación se producen durante el establecimiento de la conexión. La categoría del UE agrupa las capacidades más importantes soportadas por el terminal. En función de ella se tienen preestablecidos unos valores máximos de distintas capacidades que soporta el UE, en términos de velocidades máximas de transmisión y recepción que admite, número máximo de flujos simultáneos de comunicación y tipos de modulación, entre otras. En la Tabla 2.1 se muestran algunas de ellas en función de la categoría del terminal. Por ejemplo, de acuerdo a la Tabla 2.1, la máxima velocidad de transferencia de datos en enlace descendente y ascendente para un UE de categoría 1 es 10.3 y 5.2 Mbps, respectivamente, admitiendo, además, un único flujo simultáneo en DL. En el caso de que el UE fuera de categoría 5 soportaría hasta 300 Mbps en DL y 75.4 en UL, con hasta 4 flujos simultáneos en DL. Por lo tanto sobre la base de la categoría reportada por el UE, la e-UTRAN tendrá en cuenta las diferentes características que puede admitir el UE de cara a la asignación de recursos al mismo.

Tabla 2.1: Categorías y capacidades de UE [40].

Categoría UE	Máximo número bits recibidos en DL-SCH en un TTI	Máximo número bits recibidos en UL-SCH en un TTI	Máximo número de niveles en multiplexación espacial en DL
Categoría 1	10297	5160	1
Categoría 2	51024	25456	2
Categoría 3	102048	51024	2
Categoría 4	150752	51024	2
Categoría 5	299552	75376	4
Categoría 6	301504	51024	2 ó 4
Categoría 7	301504	102048	2 ó 4
Categoría 8	2998560	1497760	8
Categoría 9	452256	51024	2 ó 4
Categoría 10	452256	102048	2 ó 4
Categoría 11	603008	51024	2 ó 4
Categoría 12	603008	102048	2 ó 4

2.1.2 Red de acceso

Como se indicó anteriormente, la red de acceso radio de LTE, e-UTRAN, se encarga de controlar las comunicaciones en el medio radioeléctrico entre el UE y el EPC. Su arquitectura es plana, desde el punto de vista de que se basa en un único tipo de nodo llamado eNodeB, los cuales se distribuyen a través del área al que darán cobertura, tal como se muestra en la Figura 2.2.

Los eNodeB, como único nodo de e-UTRAN, son responsables de todas las funciones relacionadas con radiocomunicaciones del sistema, entre las que se encuentran las siguientes [38]:

- *Gestión de recursos radio:* control de la operación a bajo nivel de todos los terminales móviles a los que da cobertura, mediante el envío de mensajes de señalización. También se encarga del control del uso del interfaz radio gestionando la asignación de recursos en base a las solicitudes de los usuarios, priorizando y programando la asignación de éstos en base a parámetros como la calidad de servicio demandada.
- *Gestión de la movilidad:* control y análisis de los niveles de señal de los UE para la toma de decisión de traslado (*handover*) a otro eNodeB. Una vez que se decide un *handover*, se utiliza el interfaz X2 (Figura 2.2) entre los eNodeB implicados para el intercambio de información, tanto de control como de datos de usuario.

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

- *Unión entre UE y EPC*: hace de pasarela entre el interfaz radio (UE) y el interfaz IP (EPC) para la transmisión/recepción de datos de usuario y de control. La conexión de cada eNB al EPC se realiza por medio del interfaz S1. Esta comunicación se basa en IP, mientras que la comunicación con los UE se realiza por el interfaz Uu, tal y como se ilustra en la Figura 2.2.
- *Compresión de cabeceras (Header Compression)*. El objetivo de esta técnica es lograr un uso eficiente del interfaz radio mediante la compresión de cabeceras IP, evitando una sobrecarga innecesaria de información repetitiva.
- *Seguridad*: cifrado y descifrado de datos de usuario.

Estas funciones quedan resumidas en la Figura 2.4, donde, además de e-UTRAN, quedan reflejados tanto el terminal de cliente como elementos del EPC tales como MME y S-GW [38].

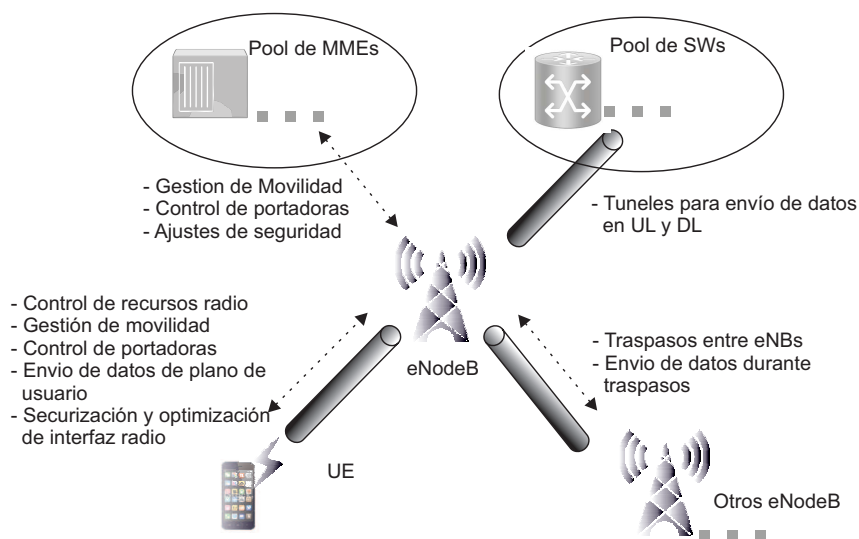


Figura 2.4: Funciones de eNB y conexiones con otros nodos (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).

2.1.3 Núcleo de red

Los sistemas 2G y 3G necesitaban dos núcleos de red distintos, de conmutación de paquetes y de circuitos. En LTE se produce una evolución en el Núcleo de Red, de manera que solamente se utiliza el Núcleo de Paquetes (EPC). El EPC está formado por diferentes tipos de nodos, representados con anterioridad en la Figura 2.2, y se resumen brevemente a continuación. Como se comentó anteriormente, las líneas discontinuas representan tráfico de señalización de red (Plano de Control), mientras que las líneas continuas representan tráfico de datos de usuario (Plano de Usuario). Los elementos constituyentes de EPC son como sigue.

Mobility Management Entity (MME). Es el principal elemento de control en el EPC. Solo opera en el Plano de Control, es decir, no está involucrado en el Plano de Usuario. Controla la operación a alto nivel del UE mediante el envío de mensajes de señalización. Las principales funciones que realiza se clasifican en dos grupos:

- Funciones relacionadas con la gestión de conexiones.

Se trata de funciones que controlan el establecimiento de la conexión, la movilidad y los procedimientos de seguridad entre el UE y la red. Por ejemplo, cuando un UE se registra en la red por primera vez, el MME inicia el procedimiento de autenticación consultando al HSS y verificando que el UE se puede conectar a la red.

- Funciones relacionadas con la gestión de portadoras.

Incluyen el establecimiento, mantenimiento y borrado de recursos asignados a UE tanto en eNB como en el S-GW. Para ello se tiene en cuenta el perfil del usuario y las necesidades de conectividad y QoS que requiera en cada momento. Intercambia mensajes de señalización con el eNB al que esté conectado el usuario y con el S-GW de cara al establecimiento de los flujos necesarios y la asignación de direcciones IP para la prestación del servicio demandado por los UE.

Las conexiones principales del MME con el resto de nodos se representan en la Figura 2.5, así como un resumen de las funciones sobre ellos. Véase [38] para más detalles.

Serving Gateway (S-GW). Actúa como un router y envía los datos de usuario entre el eNB y la pasarela hacia la red de datos (*Packet Data Network Gateway*, P-GW). Todos los paquetes de datos de usuario pasan por este nodo. Aunque los usuarios se puedan mover a través de distintos eNodeB, el S-GW hace de “punto de anclaje” con la red de datos, asegurando una conexión continua de datos sin cambio de IP.

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

En algunos casos conforma el mismo nodo que el P-GW asumiendo las funcionalidades tanto de S-GW como de P-GW.

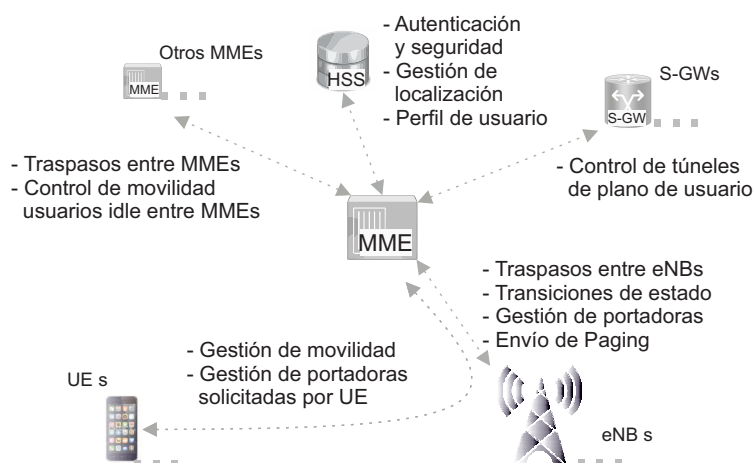


Figura 2.5: Conexiones de MME con otros nodos y principales funciones (Fuente: elaboración propia a partir de [38]).

PDN Gateway (P-GW). Es el elemento que establece la unión entre el EPS y la redes de datos externas (por ejemplo Internet). Una de sus principales funciones es la asignación de IP a los UE (transmitidas mediante mensajes de señalización por medio de MME) así como asegurar la QoS asignada a cada flujo de datos y controlar la tarificación mediante comunicación con PCRF.

Además de estos 3 nodos, MME, S-GW y P-GW, hay otros dos con los que EPC interactúa, como se ha comentado anteriormente:

- **Home Subscriber Server (HSS)**, que es básicamente una base de datos que almacena perfiles de usuarios e información de estado como puede ser: restricciones de *roaming*, información de seguridad y localización y P-GW a los que un UE se puede conectar.
- **Policy and Charging Rules Function (PCRF)**, cuyas dos funciones principales, tal como su nombre indica, son la gestión de reglas y políticas asociadas a QoS y tarificación basada en flujos.

Una vez explicada brevemente la arquitectura de LTE se pasará a describir cómo se

realiza la asignación de recursos radio a usuarios.

2.2 Gestión de recursos radio en LTE

2.2.1 Introducción

Los sistemas de comunicaciones móviles deben ser muy dinámicos debido a factores externos como pueden ser interferencias, movilidad de usuarios, variación de las condiciones de propagación o variaciones de patrones de tráfico, entre otros. Más factores importantes son la limitación de recursos radioeléctricos disponibles y que la interfaz radio tiene que soportar el acceso de los usuarios con distintos tipos de servicios, los cuales llevan asociada una determinada calidad de servicio.

Una opción para conseguir el nivel de calidad de servicio necesario sería el sobredimensionado de la red, empleando mayor número de recursos radio. El problema es que estos recursos son escasos y costosos. Por lo tanto se requiere una gestión dinámica eficiente de la interfaz radio con el mínimo sobredimensionamiento posible.

Al conjunto de técnicas y algoritmos usados para el control de estos parámetros se le denomina Gestión de Recursos Radio –*Radio Resource Management*– (RRM). Entre los parámetros a controlar se encuentran la potencia de transmisión, asignación de ancho de banda, técnicas de modulación y codificación a emplear –Técnica de Modulación y Codificación –*Modulation and Coding Scheme*– (MCS)– y otras más que se resumirán en este mismo apartado. El principal objetivo de RRM es racionalizar el uso de los recursos radio al mismo tiempo que se pretende conseguir el acceso para mayor número de usuarios posibles, garantizando en todo momento unos umbrales mínimos de QoS asociados con los servicios demandados por los usuarios a los que se presta servicio.

La consecución de estos fines es una tarea *compleja*. Como se comentó anteriormente, los sistemas de comunicaciones móviles son muy dinámicos, con variaciones constantes en su entorno. Por ello RRM consiste en un conjunto de distintas funciones –que se describen brevemente a continuación– que controlan y gestionan distintos aspectos radio y que, al trabajar conjuntamente, permitirán llegar al objetivo anteriormente descrito. Hay que tener en cuenta que las funcionalidades empleadas por RRM en los enlaces ascendente y descendente son *distintas*, si bien comparten el mismo objetivo general de optimizar el uso de los recursos. En este apartado nos centraremos en el enlace descendente, al ser éste el objeto de estudio en esta tesis. A continuación se resumen algunas de las funciones RRM más importantes definidas por 3GPP [41], detallando en el Subapartado 2.2.3 la función de Packet Scheduling, por ser la más importante para

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

el presente trabajo.

Algunas de las funciones RRM más importantes definidas por 3GPP [41] son:

- **Control de Portadora Radio, Radio Bearer Control (RBC)**. Se encarga de la configuración de los recursos radio en las fases de establecimiento, mantenimiento y liberación de las portadoras. Para ello, RBC tiene en cuenta los recursos disponibles, los requisitos de QoS de las sesiones en curso así como la QoS demandada por el nuevo servicio.
- **Control de Admisión Radio, Radio Admission Control (RAC)**. Su función es admitir o rechazar las peticiones de establecimiento de nuevas portadoras. RAC considera la situación general de la red de acceso, requisitos de calidad de servicio y los niveles de prioridad. Su principal objetivo es asegurar una alta ocupación de los recursos radio manteniendo los requisitos de QoS exigidos.
- **Control de Movilidad de Conexiones, Connection Mobility Control (CMC)**. Se ocupa de la gestión de los recursos de e-UTRAN en relación a la movilidad del terminal y su estado de conectividad. Si el terminal está en modo inactivo, mediante la recepción de broadcast enviados por los eNB, se determina la mejor celda potencial. En el modo conectado, las conexiones tienen que mantenerse sin contarse. Las decisiones de traspaso se basan en mediciones de UE y eNB. Además también se pueden tener en cuenta otras entradas, como la carga de la célula vecina, la distribución del tráfico, recursos hardware y de transporte y otras políticas definidas por el operador.
- **“Scheduling” de paquetes, Packet Scheduling (PS)**. Se encarga de la asignación/liberación de recursos, tanto para el plano de usuario como el plano de control. PS tiene en cuenta, principalmente, requerimientos de QoS, información de calidad del canal que facilita cada UE y situación de interferencias. Esta función se detallará en otro subapartado por ser parte fundamental de esta tesis.
- **Coordinación de Interferencias entre Celdas, Inter-cell Interference Coordination (ICIC)**. Gestiona los recursos radio de manera que la interferencia entre celdas se mantenga bajo control. Se trata de una función multicelda que tiene en cuenta información intercambiada de varias celdas.
- **Balanceo de Carga, Load Balancing (LB)**. La tarea de LB es controlar la distribución desigual de la carga de tráfico a través de múltiples células. Su

finalidad es, por tanto, influenciar en la distribución de la carga de tráfico de tal manera que los recursos permanezcan altamente utilizados.

Finalmente, es importante mencionar que, aunque todas estas funciones están localizadas en el eNB, no obstante, como en el caso de ICIC, existe coordinación entre varios eNB.

2.2.2 Aspectos básicos de LTE

En esta sección se presentan los principales aspectos de la tecnología LTE que desempeñan un papel importante para el desarrollo de esta tesis, como son Bloque de Recursos –*Resource Block*– (RB), TTI, Tamaño de Bloque de Transporte –*Transport Block Size*– (TBS), MCS, Tasa de Error de Bloque –*Block Error Ratio*– (BLER) o CQI.

Considérese un usuario u_l asignado (o asociado) a un eNB, etiquetado como B_k , tal y como se ilustra en la Figura 2.6. Esta asignación se representa matemáticamente como “ $u_l \in B_k$ ”. La unidad de tiempo más pequeña en la que cualquier eNB B_k asigna recursos radio a cada usuario u_l se llama TTI, siendo 1 TTI = 1 ms [11]. El número de bits que un usuario puede descargar durante 1 TTI se define como TBS. Durante 1 TTI, el eNB B_k asignará recursos al usuario u_l con una régimen binario o throughput (b/s),

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{u_l \in B_k} (\text{bit/s}) &= \frac{\text{TBS}_{u_l \in B_k} (\text{bit})}{\text{TTI} (\text{s})} = \\ &= \frac{\text{TBS}_{u_l \in B_k} (\text{bit})}{10^{-3} \text{s}} = 10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l \in B_k} (\text{bit}). \end{aligned} \quad (2.1)$$

teniéndose en cuenta la condición

$$\mathcal{J}_{u_l \in B_k} \leq R_{\text{b,Peak}}^{S_i}, \quad (2.2)$$

donde $R_{\text{b,Peak}}^{S_i}$ es la velocidad máxima asociada al servicio S_i . Es decir, el régimen binario del usuario no será superior al necesario para el servicio demandando o contratado.

Con el throughput, $\mathcal{J}_{u_l \in B_k}$ (bit/s), si un usuario u_l demanda descargar un fichero con tamaño $\mathcal{F}_{\text{size}}$ (bit), el tiempo que tardara en descargarlo, en segundos, será

$$\text{DT}_{u_l \in B_k} = \frac{\mathcal{F}_{\text{size}} (\text{bit})}{\mathcal{J}_{u_l \in B_k} (\text{bit/s})} = \frac{\mathcal{F}_{\text{size}}}{10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l \in B_k}} \quad (2.3)$$

donde DT, es el tiempo de descarga (“Download Time”), y se ha tenido en cuenta la

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

expresión (2.1).

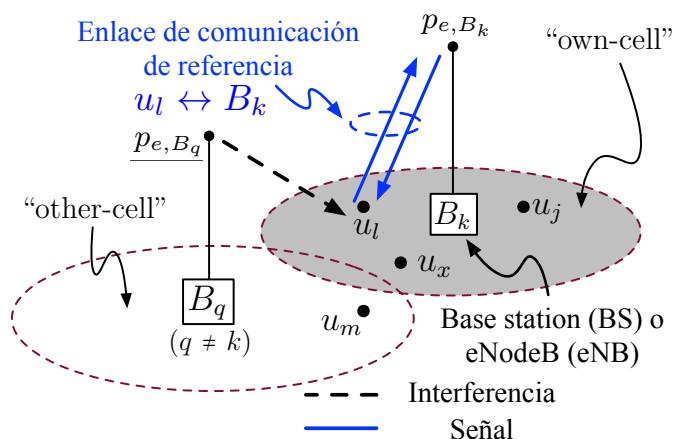


Figura 2.6: Representación simplificada de señales de comunicación (línea azul continua) e interferencias (línea negra discontinua) sobre enlace de referencia $u_l \leftrightarrow B_k$. p_{e,B_y} representa la potencia emitida por un eNB genérico B_y . (Fuente: elaboración propia).

A su vez, el valor TBS de la Expresión (2.3) depende del número de recursos disponibles del eNB al que está asignado el usuario y de las estrategias para asignarlos mediante algoritmos de asignación (algoritmo de “scheduling”) [42–44]). La Figura 2.7 muestra algunos de los factores de los que depende TBS además de representar, de una manera simplificada, cómo se usa OFDMA en el enlace descendente en LTE [16, 45], en el caso particular de FDD.

La parte más a la derecha de la Figura 2.7 muestra como dos usuarios (“1” y “2”) pueden recibir RBs durante 1 TTI. En general, los RBs se pueden asignar a los usuarios utilizando varias estrategias [42–44], algunas de las cuales se describirán en el siguiente sub-apartado. Para un mayor detalle se puede consultar la referencia [42].

Como se ha ilustrado, y se muestra más esquemáticamente en la Figura 2.8, la unidad básica para la transmisión de datos, llamada Bloque de Recursos Físico –*Physical Resource Block*– (PRB) o simplemente “Resource Block” (RB), es un *objeto* bidimensional (tiempo, frecuencia) dentro de una matriz de recursos:

- En el dominio de la frecuencia, un RB está formado por 12 subportadoras (Sub-

carriers, SCs) *ortogonales*, con un espacio entre subportadoras de 15 KHz, es decir, cada RB en el dominio de la frecuencia se expande sobre 180 KHz. La unidad más pequeña de información se transporta sobre 1 subportadora de 15KHz. Esta unidad se llama Resource Element (RE) [11, 37] y contendrá un símbolo que, en función de la modulación aplicada y de la codificación empleada, transportará más o menos bits de información, como se verá en este mismo subapartado.

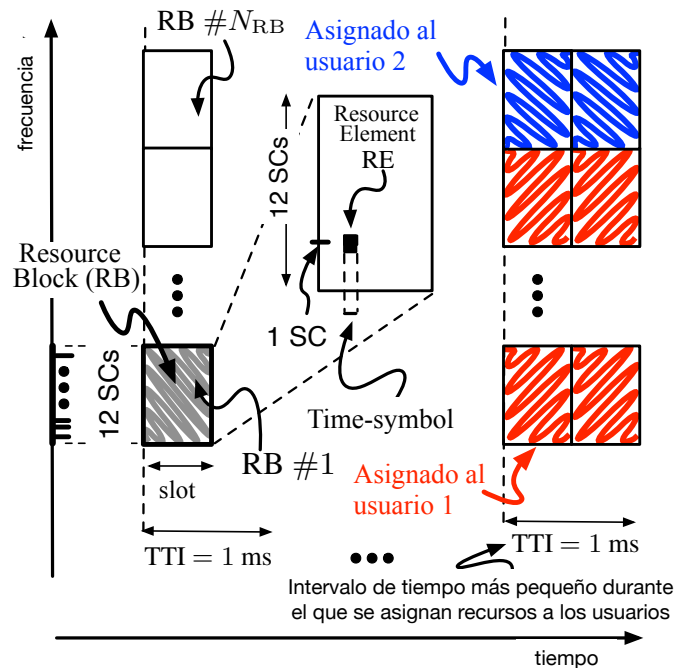


Figura 2.7: Representación de RB y TTI. (Fuente: elaboración propia).

- En el dominio del tiempo, un RB dura 0.5 ms (1 slot). Dos slots forman una subtrama de 1 ms. Una subtrama es el intervalo de tiempo mínimo que el algoritmo de asignación de recursos (“scheduler”) usa para asignar RBs a los usuarios. Como se comentó anteriormente, 1 TTI = 1 ms. El número de RE transportados en cada RB dependerá de la longitud de prefijo cíclico utilizado, Cyclic Prefix (CP). La inserción de CP al comienzo de cada símbolo es una técnica utilizada para eliminar la interferencia entre símbolos. Hay dos tipos de CP, normal y extendido, utilizados en función de los retardos ocasionados por multipropagación en celdas

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

de tamaño medio o grandes. Si se considera CP normal, cada slot contendrá 7 RE de $66.7 \mu\text{s}$ cada uno en cada subportadora (en el caso de CP Extendido serían 6 RE).

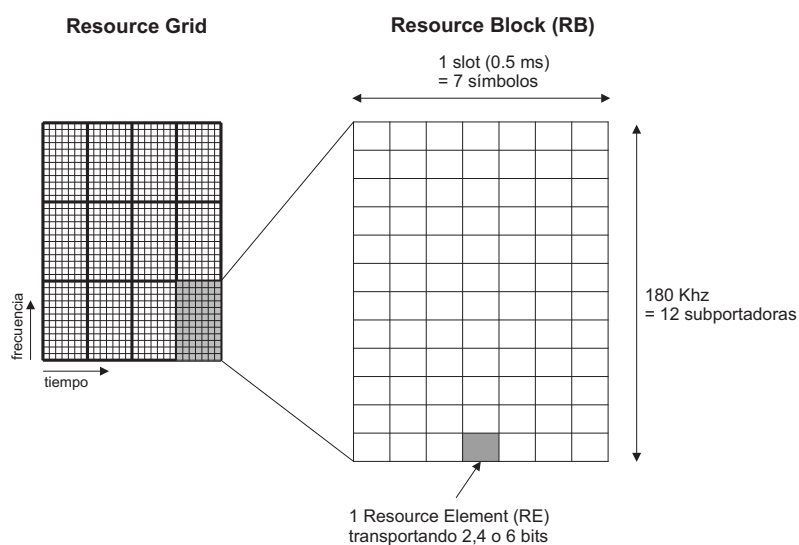


Figura 2.8: Representación esquemática en dos dimensiones (tiempo, frecuencia) de RB con CP normal. (Fuente: elaboración propia).

Otro punto clave es que el máximo número de RBs (N_{RB}) que se puede asignar a un usuario depende del ancho de banda del sistema, BW. Los distintos anchos de banda están especificados en el estándar 3GPP y se muestran en la Tabla 2.2 junto con el número de RBs asociados [46]. Por ejemplo, si el ancho de banda del sistema es $BW = 20 \text{ MHz}$, entonces, de acuerdo a la Tabla 2.2, $N_{RB} = 100$.

Tabla 2.2: Número de RBs (N_{RB}) en función del ancho de banda del sistema LTE (BW) [46].

BW (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
N_{RB}	6	15	25	50	75	100

El *throughput* o régimen binario –Expresión (2.1)– con el que un usuario es capaz de descargar un fichero no solo depende de los RBs asignados y de la estrategia de asignación sino también de la técnica de modulación y codificación empleada (MCS) en las subportadoras (RBs asignados). El MCS empleado depende de la calidad del canal en el receptor (UE). Los niveles de potencia recibidos por cada UE del eNB al que están conectados y los recibidos de los distintos eNB interferentes afectan a la Relación Señal Ruido Interferencia (SINR) de cada usuario en los dominios del tiempo y la frecuencia. Estos valores se mapean a un valor, entre 1 y 15, del parámetro CQI [47]. Cada usuario proporcionará un valor de CQI al eNB que indica el estado del canal en ambos dominios (tiempo y frecuencia) y permitirá al eNB tomar las decisiones de asignación de recursos para los distintos usuarios. El CQI para una subbanda indicará el índice de la técnica de modulación y codificación soportada por el usuario con una probabilidad de error (Block Error Rate Probability, BLER) que no exceda de 0.1 [47]. Desde este punto de vista, la técnica de adaptación de enlace en DL es sencilla ya que es el UE el que directamente proporciona un MCS a través del CQI. Los valores de CQI y otros parámetros están tabulados en LTE, lo que favorece a que el eNB determine de forma directa el MCS y TBS para un determinado UE sobre la base de su SINR mapeada en CQI.

Por ejemplo, la Tabla 2.3 muestra, en función de diferentes rangos de SINR, los valores de CQI estandarizados en [47], las técnicas de modulación a utilizarse –Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), o Quadrature Amplitude Modulation (QAM), 16-QAM o 64-QAM –, el orden de modulación (Q), y el valor correspondiente de Tasa Efectiva de Codificación –*Effective Code Rate*– (ECR) (ECR^{MCS}) [47]. Este parámetro mide la *eficiencia* de la codificación del canal LTE en el sentido en el que *no* todos los bits se usan para transportar datos de usuario sino también para detección de errores (por ejemplo, por medio de bits de código de redundancia cíclica (CRC)). Como se observa en la Tabla 2.3, valores elevados de CQI ($10 \leq CQI \leq 15$) implican que la calidad de recepción del UE es buena, lo que permite emplear técnicas de mayor orden de modulación como 64-QAM.

Basándose en los valores de CQI, el eNB asigna a un UE los valores de MCS y TBS usando las Tablas 2.4 y 2.5 de la siguiente forma. El MCS a utilizar por un UE corresponde con el MCS más alto que el UE es capaz de soportar para decodificar los datos con una $BLER \leq 0.1$ [13]. Este valor de MCS se codifica por el eNB por medio de un parámetro llamado “MCS Index” (I_{MCS}), el cual se usará como entrada en la Tabla 2.4, para determinar el valor de un índice llamado “TBS index”, I_{TBS} , que fijará el TBS asignado a un usuario por medio de la Tabla 2.5: el valor adecuado de TBS se computa usando I_{TBS} y N_{PRB} como entradas de la Tabla 2.5.

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

Tabla 2.3: Técnicas de Modulación y Codificación (MCS) en función del CQI en LTE [47]. SINR_M refiere al máximo valor de la relación señal ruido interferencia (SINR) para cada valor de CQI. ECR^{MCS} establece la tasa efectiva de codificación.

$\text{SINR}_M(\text{dB})$	CQI	Modulación	Q	ECR^{MCS}
-9.478	1	QPSK	2	0.076
-6.658	2			0.117
-4.098	3			0.188
-1.798	4			0.301
0.399	5			0.438
2.424	6			0.588
4.489	7	16QAM	4	0.369
6.367	8			0.478
8.456	9			0.601
10.266	10			0.455
12.218	11	64QAM	6	0.554
14.122	12			0.650
15.849	13			0.754
17.786	14			0.825
19.809	15			0.926

Tabla 2.4: TBS index (I_{TBS}) en función de I_{MCS} y Q [47].

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q	TBS index I_{TBS}
0	2	0
1	2	1
2	2	2
\vdots		
10	4	9
11	4	10
...		
17	6	15
18	6	16
...		
28	6	26

Tabla 2.5: TBS (en bits) en función del índice TBS (I_{TBS}) y del número de PRBs (N_{PRB}), de acuerdo a la especificación técnica del 3GPP 36.213 [47].

TBS index, I_{TBS}	Number of PRBs, N_{PRB}					100
	1	2	3	4	...	
0	16	32	56	88	...	2796
1	24	56	88	144	...	3624
2	32	72	144	176	...	4584
...					...	
26	712	1480	2216	2984	...	75370

Con el objetivo de alcanzar una mejor comprensión del procedimiento descrito anteriormente, se utiliza a continuación el siguiente ejemplo. Imagínese una red LTE con un $BW = 20$ MHz ($\Rightarrow N_{\text{PRB}} = 100$, de acuerdo a la Tabla 2.2), en la cual un UE tiene $CQI = 15$ ($\Rightarrow Q = 6$, en la Tabla 2.3) e $I_{\text{MCS}} = 28$. Entonces, insertando $I_{\text{MCS}} = 28$ en la Tabla 2.4, el correspondiente “TBS index” será $I_{\text{TBS}} = 26$. Finalmente, introduciendo el valor $I_{\text{TBS}} = 26$ y $N_{\text{PRB}} = 100$ (ya que $BW = 20$ MHz) en la Tabla 2.5, el valor correspondiente de TBS será $TBS = 75370$ bits, lo que se traduce en un throughput instantáneo (Expr. 2.1) de $\mathcal{T} = 75.37$ Mbps.

2.2.3 Packet scheduling

El “scheduler” controla la asignación de recursos compartidos entre los usuarios en cada instante de tiempo. Asigna dinámicamente los recursos a los usuarios para que estos puedan realizar transmisiones de forma ordenada a través del interfaz radio satisfaciendo las necesidades de QoS de los UE. Entre las decisiones a tomar se encuentran qué usuarios van a transmitir, sobre qué recursos de la interfaz radio lo harán, y qué técnica de modulación y codificación se ha de emplear (MCS), basándose en el *feedback* del UE (CQI). Su principal objetivo es maximizar la eficiencia espectral, teniendo en cuenta las variaciones producidas por la diversidad multiusuario, tanto en el tiempo como en la frecuencia, como consecuencia de desvanecimientos, propagación multitrajecto o efecto Doppler, entre otros [42].

En el dominio del tiempo, la diversidad multiusuario se puede explotar debido a que, si hay varios usuarios, hay mayor probabilidad de que alguno de ellos tenga una mejor calidad de canal en una determinada subtrama. Si el scheduler¹ tiene en cuenta el estado del canal de cada usuario, podría entonces asignar los recursos en esa subtrama al usuario con mejor calidad, aprovechando de esta manera mejor los recursos radio. Este mismo concepto se puede extender al dominio de la frecuencia, donde se tendrán en cuenta variaciones de canal producidas, por ejemplo, por desvanecimientos. En la Figura 2.9 se muestra como el scheduler selecciona el usuario al que transmitir los datos de manera que se consiga que el sistema trabaje más eficientemente, teniendo en cuenta, tanto en el dominio temporal como en el de la frecuencia, que el canal se percibe de forma distinta por cada usuario.

La asignación de recursos realizada por el scheduler se basa en un parámetro, conocido como métrica, que indicará la prioridad de transmisión de cada usuario en función del valor de la misma. Su cálculo se puede centrar en distintas particularidades de los

¹Utilizamos le término anglosajón por ser el más empleado habitualmente.

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

flujos de datos a enviar al UE y de las características de recepción del mismo, como pueden ser [42]:

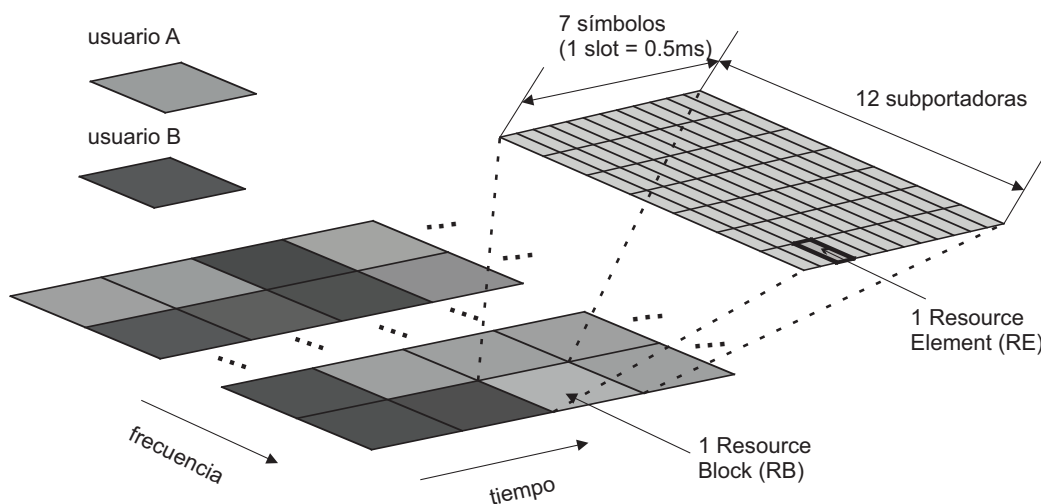


Figura 2.9: Diversidad multiusuario. (Fuente: elaboración propia).

- Estado de colas de transmisión: se puede usar para minimizar el retardo en el envío de paquetes.
- CQI: se usaría para asignar recursos a usuarios que experimenten mejores condiciones de canal.
- Histórico de asignación de recursos: para buscar una proporcionalidad en el reparto de recursos de manera que no se asignen los recursos siempre a los mismos usuarios.
- Estado de buffers: las condiciones del buffer del receptor se podrían tener en cuenta de cara a evitar pérdidas de paquetes y retransmisiones.
- Requerimientos de QoS: teniendo en cuenta la QoS requerida para determinados servicios.

En cada TTI el scheduler planifica la asignación de recursos para el siguiente TTI, informando a los UEs a través del canal de control Physical Downlink Control Channel (PDCCH).

En la Figura 2.10 se representan los principales módulos de RRM que interactúan con el scheduler. En base a parámetros de entrada como los comentados anteriormente y a la información retroalimentada que facilita el UE por medio del CQI, el scheduler decide a qué usuarios asignar los recursos disponibles. La selección de la modulación y codificación a emplear (MCS), en función de las condiciones del canal y las características del terminal, la realiza el módulo de Modulación y Codificación Adaptativa –*Adaptative Modulation and Coding*– (AMC).

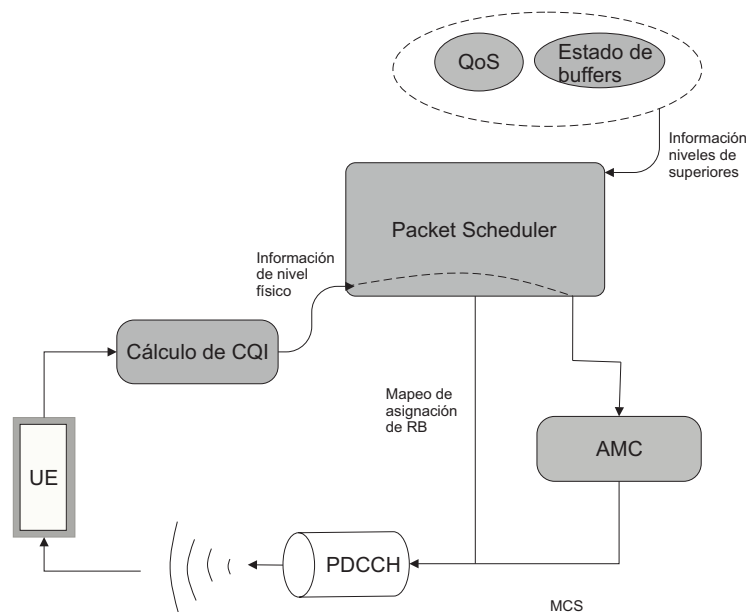


Figura 2.10: Esquema de scheduler. (Fuente: elaboración propia).

El scheduler reside en el eNB tanto para DL como para UL. Además, hay que considerar que el eNB puede tener en cuenta información proveniente de otros eNBs a la hora de asignar algunos recursos radio de cara a coordinarse con ellos y mitigar interferencias intercelulares. Estos mecanismos forman parte de la función ICIC introducida en el Apartado 2.2.1.

2.2.3.1 Estrategias de *scheduling*

No es misión del estándar 3GPP definir las estrategias específicas en cuanto a las decisiones de qué usuarios transmiten y sobre qué PRB, sino definir los mecanismos para

2. REVISIÓN DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LTE

hacer posible la asignación de recursos. Estas estrategias suelen ser implementadas por los propios fabricantes de equipos. Si bien hay varias estrategias comunes para decidir sobre cada PRB y en cada subtrama qué usuario debe transmitir, destacan entre ellas las tres siguientes:

- *Round Robin*: otorga a cada usuario recursos durante el mismo tiempo. Se van asignando a cada usuario en orden, usuario tras usuario, secuencialmente, sin tener en cuenta las condiciones del canal ni ninguna otra característica. La principal ventaja de este método es la facilidad de implementación, siendo su principal desventaja el hecho de que no se adapta a las necesidades de los usuarios al no considerar las condiciones del canal.
- *Maximum CQI*: asigna los PRBs a los UE con mayor CQI en el RB. Este algoritmo ayuda a mejorar el throughput de los usuarios asignando los PRB a UE con buenas condiciones del canal, teniéndose como resultado la mejora en cuanto a throughput. Su principal desventaja es que los UE localizados en el borde de la celda difícilmente tendrán la posibilidad de que se le asignen recursos ya que habrá otros con mayor CQI que ellos.
- *Proportional Fair*: combina un uso del canal radio eficiente con un reparto equitativo de los recursos entre los usuarios de forma que ninguno se quede sin posibilidad de disponer de ellos. Por un lado tienen en cuenta el CQI, priorizando a los que mayor CQI tienen, y, por otro, el rendimiento medio pasado de cada UE. Este último factor se utiliza como corrector, de manera que si un usuario con buenas condiciones de canal (CQI alto) tiene un histórico de descarga elevado respecto al resto, será penalizado, facilitando, de esta manera, que usuarios con peores condiciones de recepción puedan empezar a descargar datos.

Capítulo 3

Revisión del estado del arte

Tal y como se ha motivado en el Capítulo 1, el objetivo general de esta tesis es hacer contribuciones novedosas en el campo del *dimensionado* de las redes LTE, incluida la *asignación de usuarios a eNBs* mediante un planteamiento novedoso que incluye, entre sus contribuciones, un *algoritmo evolutivo* especialmente diseñado para este problema que, como se verá, exhibe gran complejidad computacional.

El *objetivo* del presente capítulo es revisar el estado del arte. Para ello, el resto de este capítulo se organiza como sigue:

- La Sección 3.1, tras analizar los aspectos esenciales del dimensionamiento en LTE, e introducir, por claridad, un conjunto de conceptos que se utilizarán a lo largo de esta tesis, discute los trabajos existentes relacionados.
- Como se verá, la planificación de redes LTE es un proceso extraordinariamente complejo que requiere herramientas software altamente especializadas. La Sección 3.2 se centra exclusivamente en la revisión de las herramientas de planificación existentes. La conclusión de tal revisión es que se precisa de una herramienta nueva y flexible que permita investigar aspectos que las herramientas comerciales no permiten. Esta es una de las causas que motiva la investigación realizada en esta tesis.
- Para poner en contexto la contribución de esta tesis que se centra en la asignación usuario-celda en LTE, la Sección 3.3 revisa las diferentes técnicas de asignación de usuarios a nodos, tanto las utilizadas en la industria, como las propuestas por el mundo académico, cuyos enfoques son, como se verá, muy distintos.
- Como una de las novedades de esta tesis es solucionar el problema de la asociación

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

usuario-celda (en entornos realistas) mediante un algoritmo evolutivo, la Sección 3.4 revisa la literatura centrada en la aplicación de técnicas de Computación Evolutiva en LTE, llegando a la conclusión de que la propuesta de esta tesis, publicada en [36], es novedosa.

- Finalmente, la Sección 3.5 resume las conclusiones obtenidas en la revisión del estado del arte realizada en este capítulo.

3.1 Dimensionamiento de red LTE: fundamentos y estado del arte

3.1.1 Fases del proceso de planificación de red LTE

El objetivo de una adecuada planificación de una red LTE debe ser un compromiso entre cobertura, capacidad, calidad de servicio y coste [21]. El proceso de planificación de red tiene como fase inicial la etapa de dimensionado que proporciona la primera estimación del número de elementos de red necesarios para satisfacer los niveles de servicio demandados. En el caso de una red LTE, el propósito del dimensionado es estimar el número de eNB necesarios para soportar una carga de tráfico específica en un área geográfica [48] y con unos parámetros de calidad de servicio mínimos garantizados en el borde de cualquier celda.

A alto nivel se puede considerar que hay 4 fases principales del ciclo de planificación [12], que se ilustran en la Figura 3.1.

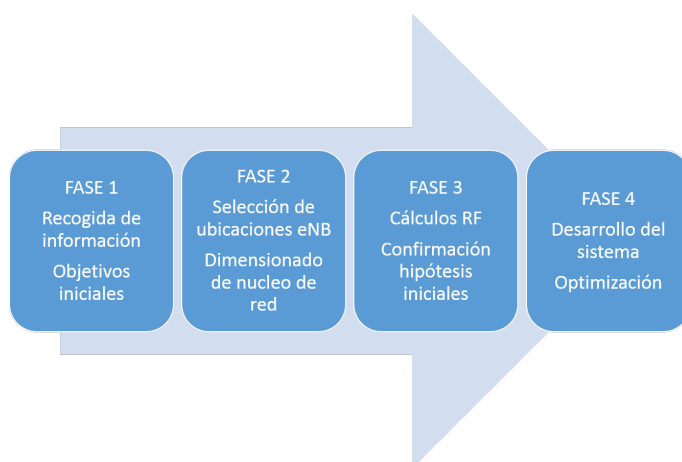


Figura 3.1: Representación de las fases de planificación de red a alto nivel. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).

3.1 Dimensionamiento de red LTE: fundamentos y estado del arte

Este proceso comienza con la recolección de información y el establecimiento de objetivos iniciales en cuanto a cobertura y capacidad. Se tendrá en cuenta información acerca de la tecnología a utilizar, patrones de tráfico, requisitos de calidad de servicio, modelos de propagación, datos sobre rendimiento de equipos de uno o varios fabricantes e información demográfica y geográfica. Estos parámetros de entrada se resumen en la Figura 3.2.

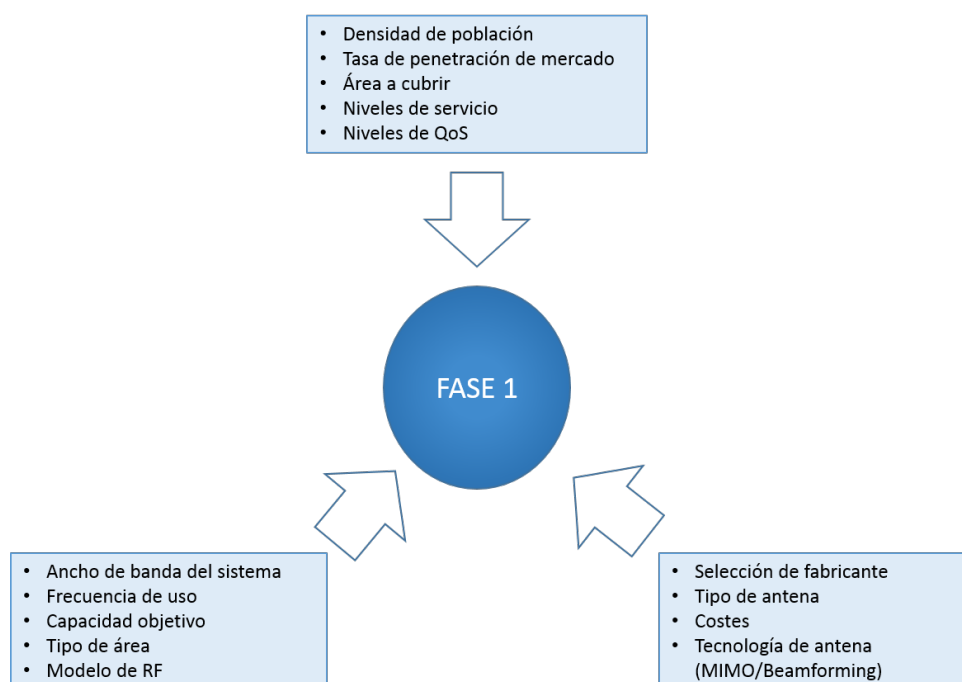


Figura 3.2: Información necesaria en Fase 1. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).

La información recogida durante esta primera fase se utiliza para verificar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados y para determinar la viabilidad del modelo de negocio. Los pasos más importantes dentro de esta fase son:

- Recopilación información técnica y de comercialización.
- Establecimiento de objetivos primarios basados en supuestos iniciales, como tipo de servicio, cobertura, capacidad, etc.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

- Determinación del número de eNB requeridos para cumplir con los objetivos planteados mediante el empleo de herramientas software de planificación.

El principal objetivo de la fase 1 es determinar el *número óptimo* de eNB con el que se cumplan los requisitos planteados en términos de cobertura, capacidad, calidad de servicio y coste. Para ello es fundamental el cálculo del interfaz radio (subapartado 3.1.2), mediante el cual, para un área geográfica determinada y con unos requisitos mínimos de calidad de servicio a cumplir, se calculan los radios celulares, dato con el que se obtiene el número de eNB estimados en cuanto a necesidad de cobertura. Con este valor se comprobará el cumplimiento del requisito de capacidad del sistema.

Como se ha comentado, el resultado de fase 1 es el número de eNB necesarios para cumplir los objetivos anteriores. Sin embargo, su ubicación definitiva está aún por determinar. En la Fase 2 del proceso de planificación se determina la *mejor ubicación* para los eNB y los requerimientos para el dimensionado del “backhaul”.



Figura 3.3: Información necesaria en Fase 2. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).

Una vez que se han establecido las ubicaciones finales de los eNB, en Fase 3, mediante el empleo de herramientas software, se contrastarán los supuestos de la Fase 1, en cuanto a cobertura y capacidad, realizándose modificaciones al planteamiento inicial en caso necesario.

Por último, antes de realizar el despliegue final y para confirmar que los resultados de las simulaciones realizadas por medio de herramientas software son válidos, se realizan pruebas de campo en Fase 4. Cualquier discrepancia entre la predicción de Fase 3 y las medidas reales se usará para ajustar los modelos de predicción y realizar mecanismos de optimización.



Figura 3.4: Esquema de la información necesaria en Fases 3 y 4. (Fuente: elaboración propia a partir de [12]).

3.1.2 Consideraciones generales del proceso de dimensionado

El proceso de dimensionado empieza con el cálculo de Dimensionado de Enlace Radio –*Radio Link Budget*– (RLB). Para ello se calcula Máxima Pérdida de Propagación Permisible –*Maximum Allowable Path Loss*– (MAPL) entre el transmisor y el receptor, tanto para el enlace ascendente como para el descendente. De esta manera se obtendrá como resultado el radio celular para los diferentes tipos de área de la zona de estudio (entornos urbano denso, urbano, sub-urbano o rural), teniendo en cuenta el modelo de propagación adecuado para cada entorno, tales como los modelos *one-slope* y *two-slope*, basados en el modelo Cost 231 Hata [35] y utilizados en esta tesis. Una vez calculado el radio celular y considerando el área geográfica, se obtiene el número de eNB necesarios para dar cobertura a dicha área, para proceder seguidamente al cálculo de la capacidad. Si los recursos proporcionados por el volumen de eNBs calculado satisfacen los requerimientos de capacidad, esto implica que la estimación del número de eNBs es adecuada para cumplir ambos requisitos. En caso contrario se tienen que añadir eNBs para conseguir los objetivos de capacidad y volver a comprobar ambos requisitos.

Este proceso tiene las siguientes fases como se muestra en la Figura 3.5 [15, 49, 50]:

1. Definición de datos de entrada del sistema y parámetros de servicio: En este punto se tendrán en cuenta los requisitos a nivel de servicio para garantizar éste en el borde de la celda.
2. Estimación de la cobertura: El cálculo de RLB es la base para la estimación de la cobertura debido a que de él se obtiene la pérdida máxima de propagación. Con este valor se calcula el rango de la celda, mediante el cual se estima el área cubierta por cada eNB y, de esta manera, el número estimado de eNB en el área geográfica de estudio.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

3. Estimación de capacidad: Una vez obtenido el número de eNBs que cumple el requisito de cobertura, se verifica si son suficientes para soportar la capacidad total del sistema. Esta depende de varios factores como, por ejemplo, el ancho de banda del sistema, la técnica de “scheduling”, empleo de técnicas de antena con múltiples entradas/salidas (las cuales dan la posibilidad de envío y recepción de datos en haces paralelos incrementando, por tanto, la capacidad), o los niveles de interferencia. En caso de incumplir los requisitos de capacidad será necesario replantear la situación inicial para dotar de la capacidad adecuada a la red, bien mediante la modificación de parámetros del sistema como los enumerados anteriormente, o bien mediante la inclusión de nuevos eNB que la proporcionen. Una vez que se obtiene el número de eNB necesario que proporciona la capacidad requerida al sistema, se compara con el número de eNB obtenidos en la estimación de cobertura, seleccionándose como el valor final el más restrictivo, es decir, el mayor.
4. Red de transporte. En este punto se dimensionan los interfaces hacia el núcleo de red LTE (interfaz S1) y entre eNBs (interfaz X2).

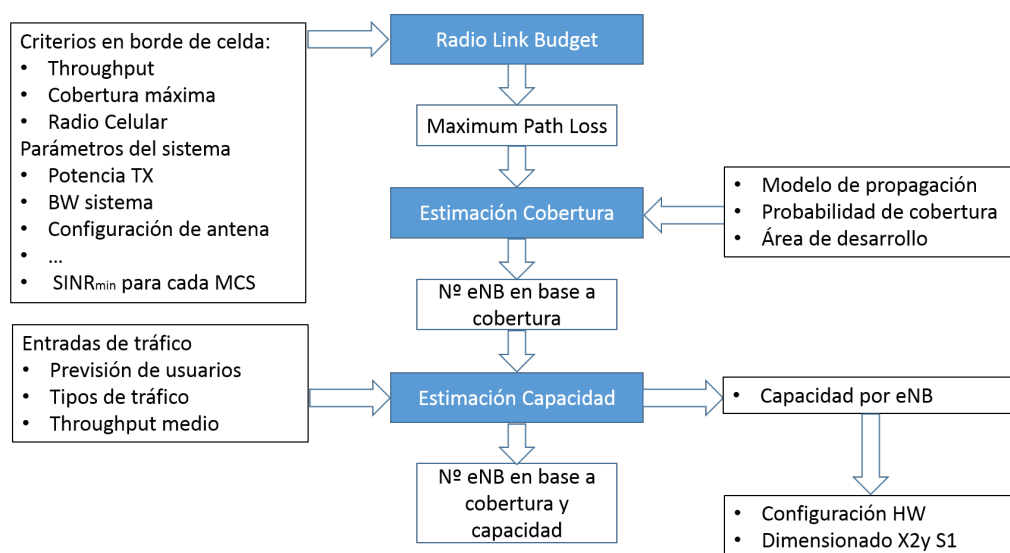


Figura 3.5: Dimensionado de red LTE. (Fuente: elaboración propia a partir de [51]).

Con los pasos anteriores se obtiene una evaluación inicial de la red LTE que formará

3.1 Dimensionamiento de red LTE: fundamentos y estado del arte

la base de una planificación más detallada.

Para el cálculo de RLB se tienen en cuenta una gran cantidad de factores, entre los que se encuentran: pérdidas de penetración en edificios, pérdidas en conectores, ganancias de antenas, margen de interferencia. El objetivo es tener en cuenta todas las ganancias y pérdidas que puedan afectar a la cobertura final de la celda. El radio celular de un eNB se usará para estimar el número de eNB necesarios para proporcionar la cobertura. La Figura 3.6 resume las entradas y salidas necesarias para el cálculo del radio celular, mientras que la Figura 3.7 representa las ganancias y pérdidas en los enlaces UL y DL entre eNB y UE.



Figura 3.6: Entradas y salidas para cálculo de enlace radio. (Fuente: elaboración propia a partir de [51]).

La propagación radio varía considerablemente entre diferentes entornos. En otras palabras, para considerar adecuadamente diferentes factores que afectan a la propagación tales como la densidad de edificios, estructura de las calles, características de obstáculos, se requiere utilizar diferentes métodos de modelado correspondientemente adaptados. Los modelos de propagación tienen en cuenta las diferencias en el comportamiento de atenuación radio de los diferentes tipos de área en términos de corrección específicos de cada entorno. Para el cálculo del enlace radio se recomienda considerar los siguientes tipos de áreas:

- DU: este tipo de entorno denso urbano tiene un gran volumen de edificios altos, con alturas superiores a 40 m. Los obstáculos son muy parecidos unos a otros. En este caso la densidad de población se podría considerar en torno 7000 habitantes/km².
- U: formado por edificios altos (inferiores a 40m), oficinas, comercios, etc. Hay distintos tipos de obstáculos en cuanto a morfología. La densidad de población rondaría los 4500 habitantes/km².

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

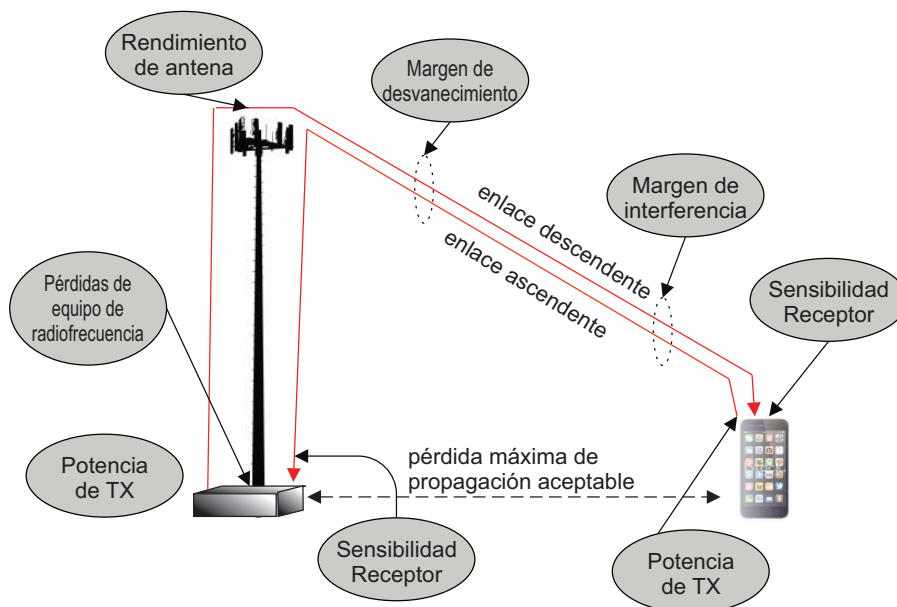


Figura 3.7: Representación ilustrativa del conjunto de ganancias y pérdidas necesarias para cálculo de MAPL. (Fuente: elaboración propia).

- Suburbano –*Suburban*– (SU): constituido por áreas residenciales con algo de vegetación, con una altura de edificaciones no superiores a 15 m. El valor de densidad de población en entorno suburbano se puede estimar alrededor de 1200 habitantes/km².
- R: el entorno rural tiene pocas edificaciones y está formado por vegetación, árboles o agua. La densidad de población se puede considerar alrededor de 300 habitantes/km².

Los modelos de propagación se adaptarán al medio en el que los eNB estén ubicados. A partir de la formulación matemática del modelo de propagación se obtendrá el valor de la pérdida de propagación en función de la distancia. Considerando el valor de MAPL se obtiene entonces el radio celular y, por consiguiente, el número de eNB que cubren el área geográfica de estudio. Con este valor de entrada se comprueba si son suficientes para el cumplimiento de las necesidades de capacidad del sistema. En nuestro caso se verifica si la velocidad media de descarga de los diferentes servicios satisface los requisitos mínimos del servicio para poder ser cursado.

3.1.3 Dimensionado: trabajos relacionados

De acuerdo a lo descrito con mayor detalle en la Sección 6, desde el punto de vista de dimensionado de red, el principal objetivo de esta tesis es el cálculo, de forma automática, del número de eNB necesarios para dar cobertura a un área geográfica, garantizando el cumplimiento del requisito de *Velocidad de Descarga* mínima de servicio, en un entorno multiservicio y multiusuario. Para ello se calcula el tiempo de descarga de cada usuario en el área para el servicio disfrutado, a partir del cual se calcula la velocidad de descarga de cada uno de ellos y la velocidad media de cada uno de los servicios ofertados.

En la revisión del estado del arte en cuanto a planificación estratégica de red radio en LTE se observa que, en [52], se proporciona un método mediante el cual, a partir de la recopilación de información de requisitos del sistema, se realiza un análisis en base a cobertura y capacidad aplicado a la ciudad de Dhaka. Para el cálculo de requisitos de capacidad se basa en una herramienta SW ya desarrollada [53], dando como resultado el número de usuarios por celda de forma que el eNB soporte la estimación de tráfico de dichos usuarios. En base a este dato y conociendo el número de usuarios del sistema se realiza el cálculo del número de eNB en base a capacidad.

El análisis en base a capacidad se trata con menor profundidad en [54]. Este se centra en casos de cobertura e interferencias, y analiza la relación entre tamaño de celda, la velocidad binaria en el borde de la celda y carga de la red, además de estudiar el impacto de distintas configuraciones de antena en los resultados en base a cobertura. Por otro lado, en [55] se desarrollan herramientas de planificación radio LTE, de nuevo en base a cobertura, y considerando como resultado una determinada calidad de servicio. Para el estudio en base a capacidad se utiliza la herramienta comercial Atoll (3.2.1.1).

En [56] se estudia la capacidad, cobertura del sistema y la planificación de frecuencias en LTE. Se analiza el caso de cálculo de cobertura en sistemas limitados por interferencias. En cuanto a capacidad se obtienen indicadores de velocidad media y número de usuarios que soporta el sistema mediante la herramienta comercial WRAP [57]. A su vez se describen técnicas de asignación de frecuencias que mitigan la interferencia entre símbolos.

El reciente trabajo [58] se centra en el cálculo del enlace radio y la planificación en base a cobertura, tanto para UL como DL, analizando los efectos en el comportamiento del sistema de parámetros como altura del eNB, número de antenas de transmisión y sensibilidad del receptor. Realiza, a su vez, una comparativa entre diferentes modelos de propagación.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Debido a su gran complejidad, la planificación de redes LTE requiere herramientas software muy precisas. La Sección 3.2 siguiente revisa la situación actual de éstas, con el objetivo de posicionar claramente la investigación de esta tesis y comprobar hasta qué punto es novedosa.

3.2 Herramientas de planificación de red: estado del arte

El empleo de simuladores de red es fundamental para evaluar el desarrollo y estandarización de LTE.

La optimización de los parámetros de LTE tiene gran valor tanto en el campo de la industria como en el académico. Una evaluación objetiva de la planificación, optimización y rendimiento de una red LTE requiere de simuladores complejos. Estas herramientas, en la mayoría de los casos, son específicas de fabricante o comerciales, y no están disponibles sin licencia, además de ser entornos cerrados, por lo que se dificulta su uso en la comunidad académica. Existen otros casos desarrollados en la comunidad académica pero en cooperación con la industria, lo que se traduce en que, para su uso, es necesario una licencia y sus códigos no están disponibles [59].

El objetivo de esta sub-sección es la revisión de las herramientas de planificación LTE más utilizadas en la actualidad. La importancia de las herramientas de planificación y simulación es esencial para poder desplegar y actualizar redes que permitan alcanzar un balance adecuado entre calidad de servicio (para el cliente) y beneficio económico (para el operador). A este respecto, las herramientas de simulación y planificación se pueden clasificar en dos grandes grupos: comerciales y no comerciales.

3.2.1 Herramientas comerciales: revisión

3.2.1.1 Atoll

ATOLL es una herramienta software, desarrollada por la compañía Forks [60], para planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y estudiar el comportamiento de las mismas de cara a su optimización. A partir del año 2008 ATOLL cuenta con un módulo LTE, el primero en el mercado, que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN.

Además, no sólo contiene herramientas para el diseño de la red de acceso de móvil sino que proporciona también una herramienta que permite el mismo objetivo en cuanto

3.2 Herramientas de planificación de red: estado del arte

al backhaul mediante enlaces de microondas.

En la actualidad, Atoll es una de las herramientas de planificación y optimización de la red de acceso radio más utilizadas en el mercado, con más de 6500 licencias contratadas y presente en 115 países [60]. Permite tanto el diseño como la optimización de redes móviles basadas en varias tecnologías –*Multiple Radio Access Technologies*– (Multi-RAT), soportando las tecnologías 3GPP (GSM, UMTS, LTE) y 3GPP2 (Acceso Múltiple por División de Código –*Code Division Multiple Access*– (CDMA), LTE). Permite la planificación y el análisis de redes integradas con varias de las tecnologías mencionadas, HetNets, *offloading* (descargar de tráfico macro-celdas hacia otras como *small cells*, por ejemplo femto-celdas) y Wi-Fi. Centrándonos en sus funciones en LTE, Atoll ha sido la primera herramienta de planificación LTE en el mercado y permite un análisis completo desde el punto de vista frecuencial, así como la posibilidad de crear un mapa de usuarios multi-servicio desde diferentes fuentes. Podemos obtener resultados como mapas de cobertura así como predicciones del throughput agregado o de la calidad del servicio y la Planificación de Frecuencias Automática –*Automatic Frequency Planning*– (AFP).

3.2.1.2 Mentum Planet

Otra de las herramientas más utilizadas por las operadoras es Mentum Planet, desarrollada por InfoVista. En la actualidad Mentum Planet está presente en 90 países con más de 250 clientes [61]. Destaca por ser la única herramienta que incluye MapInfo Professional de GIS (Geographic Information System), un complemento que permite al usuario importar datos geográficos o mapas de tráfico [61]. Mentum Planet tiene la capacidad de trabajar con múltiples estándares y tecnologías de acceso, incluyendo GSM, Servicio General de Paquetes via Radio –*General Packet Radio Service*– (GPRS), EDGE, WCDMA, HSPA, HSPA+, LTE, Wi-Fi y WiMAX entre otras, lo que la hace ser muy completa a la hora de estudiar una región en la que coexisten varias de estas tecnologías. También implementa múltiples modelos de equipamiento y modelos de propagación.

En cuanto a la planificación del tráfico, ofrece unos resultados simples y generales, teniendo que recurrir a otra herramienta para hacer un análisis más completo en este aspecto. Este complemento lo ofrece el mismo desarrollador y se conoce con el nombre “VistaInsight for Planet”. Permite éste obtener resultados del “throughput” celular (tanto en UL como en DL), número de usuarios activos, tasa de llamada y “handover” experimentados en la red, pudiendo estimar estos datos desde fuentes reales

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

(monitorizando una red) o desde las simulaciones de Mentum Planet [62]. Aunque Mentum Planet, unida al complemento *VistaInsight for Planet*, constituye una valiosa herramienta capaz de hacer simulaciones de una red completa, con varias tecnologías coexistiendo y creando una gran variedad de resultados y representaciones, no proporciona, sin embargo, un análisis a nivel de TTI. Ésta es una de las novedades importantes de la herramienta desarrollada en esta tesis, que sí proporciona resultados en cada TTI, tanto de cada uno de los usuarios, como de los eNB.

3.2.1.3 Asset

Esta herramienta desarrollada por TEOCO está centrada en el dimensionamiento, atendiendo a cobertura y capacidad [63], y permite trabajar con distintas tecnologías, entre las que se incluyen GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE y WiMAX [63]. ASSET está fundamentalmente orientada a una planificación de RAN, incluyendo múltiples usuarios y ubicaciones de eNB. Ofrece variadas opciones en el modelado por propagación, pudiendo ser configurados tanto manualmente como automáticamente. Finalmente genera un amplio abanico de mapas de cobertura y tráfico (en 2D y 3D), pudiendo también proporcionar resultados estadísticos. En cuanto al modelado del tráfico, ASSET permite realizar predicciones y análisis de la capacidad de la red. Igualmente tiene el potencial de modelar nuevos servicios, implementando nuevos escenarios. También implementa una herramienta para analizar las relaciones entre las ubicaciones, incluyendo “handovers” y posibles interferencias.

Sin embargo, para conseguir un análisis más detallado resulta necesario recurrir a un complemento de la herramienta, llamado CAPESSO, que ha sido desarrollado por la misma compañía. Este complemento realiza la planificación celular centrándose en el modelado del tráfico y se integra con ASSET, de forma que CAPESSO y ASSET pueden intercambiar datos y resultados [64]. Al igual que las anteriores herramientas, ASSET no proporciona un análisis tan exhaustivo como el que ofrece la plataforma desarrollada en esta tesis en cuanto al historial en tiempo de las simulaciones.

3.2.1.4 ASTRIX Radio Planning System

ASTRIX es una herramienta de planificación radio que ofrece además funciones de mantenimiento y optimización de redes radio celulares. La herramienta proporciona diversos módulos. Éstos se diferencian en función de la tecnología, que permiten la planificación de 2G (GSM), 3G (UMTS) y 4G (LTE) [65].

ASTRIX proporciona una vista simultánea de distintas tecnologías, así como un

3.2 Herramientas de planificación de red: estado del arte

sistema de mapas, para poder mejorar la visualización del entorno planificado. También tiene en cuenta los diferentes parámetros de la antena, como la inclinación y los lóbulos secundarios y traseros, entre otros. Los modelos de propagación que utiliza son Okumura-Hata, COST 231-Hata, COST231-Walfisch, y Blomquist-Ladell. Además introduce ciertos factores de corrección para mejorar la precisión en distintos terrenos y exclusión de datos espurios. La herramienta ofrece un algoritmo que combina la cobertura calculada mediante los modelos de propagación con un sistema de mediciones de “drive test” que ayuda en la predicción de las condiciones del entorno. Dispone de archivos de cobertura oficiales, que pueden ser fusionados con los cálculos obtenidos en un único archivo a disposición del simulador para poder optimizar el procesado de futuros cálculos en situaciones similares [65]. El simulador posee un módulo de análisis que permite el cálculo de mapas de densidad de tráfico en función del tráfico estimado en la red o de la morfología del área, lo que permite obtener el tráfico en tiempo real por celda. El planificador de LTE de esta herramienta permite dimensionar la red teniendo en cuenta las demás tecnologías (2G y 3G), permitiendo planificar en función de la tecnología ya desplegada. Los principales parámetros calculados por el simulador son Potencia de Señal Recibida de Referencia –*Reference Signal Received Power*– (RSRP), Indicador Intensidad de Señal Recibida –*Received Signal Strength Indicator*– (RSSI), Calidad de Señal Recibida de Referencia –*Reference Signal Received Quality*– (RSRQ), figura de ruido, tasa de bits por RB (regimen binario) y Tasa de Ruido a Portadora –*Carrier to Noise Ratio*– (CNR). También ofrece herramientas para el cálculo del rendimiento en función de la configuración de red, comparadores entre la capacidad y la densidad de población, análisis de capacidad y cobertura para diferentes mapas de población [65]. Todas estas características convierten a ASTRIX en una de las herramientas más destacadas en la planificación de redes móviles LTE.

3.2.1.5 CELPLA L

La última herramienta de tipo comercial a destacar es CELPLA L [66], desarrollada en Japón a partir de los trabajos de la compañía NTT DOCOMO. A diferencia del resto, se limita a la planificación de la tecnología LTE. Exhibe el potencial de obtener automáticamente los parámetros necesarios para el diseño de una red LTE. Éste se realiza en tres pasos:

1. Introducción en base de datos de diferentes parámetros referentes a estaciones base, incluyendo tanto los parámetros físicos del eNB (ubicación, potencia, altura...) como sus características (equipamiento, tipo...).

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

2. Cálculo de parámetros de diseño, ofreciendo la posibilidad de modificar manualmente las características de alguno de los eNB.
3. Cálculo de los resultados de salida, incluyendo la asignación de usuarios a las células y sectores o las coberturas de cada uno [66].

3.2.2 Herramientas no comerciales: estado del arte

Son pocos los proyectos existentes que permiten el uso de forma libre bajo licencias académicas o no comerciales de simuladores de sistemas LTE. Los principales se describen brevemente a continuación.

3.2.2.1 *LTE downlink level and system level simulator*

Este proyecto ha sido desarrollado por el Instituto de Telecomunicaciones de la Universidad de Tecnología de Viena [67]. Su primera fase se denominó “LTE Downlink Link Level Simulator” [68]. Este simulador se encarga de la evaluación del Nivel Físico de LTE siendo las principales características que implementa AMC, transmisión MIMO, múltiples usuarios y “scheduling”. El lenguaje de programación en el que se encuentra implementado es mayoritariamente “MATLAB”, solo funciones de alto coste computacional se implementan en “C” o funciones “MEX”. Su código está abierto de forma que puede ser modificado para obtener resultados adhoc. Este simulador permite tres tipos de escenarios:

- Enlace descendente único: solo cubre el enlace entre un eNB y un UE.
- Celda única multi-usuario: cubre los enlaces entre un eNB y múltiples UEs.
- Multi-celda multi-usuario: cubre los enlaces entre múltiples eNB y múltiples UEs.

La segunda fase del simulador fue “System Level Simulation of LTE Network” [53] donde se investiga el rendimiento de la red reflejando los efectos en el sistema de funcionalidades como planificación celular, “scheduling” o interferencias.

Sus resultados permiten describir el comportamiento del nivel físico de LTE obteniéndose, entre otros, la tasa BLER y el régimen binario asociado a cada MCS. Igualmente permite comparar el rendimiento a nivel de régimen binario de sistemas de Entrada Única Salida Única (SISO) y MIMO así como evaluar el rendimiento de la red mediante la aplicación de distintos algoritmos de planificación. Entre las publicaciones más recientes que han utilizado esta plataforma, Ademaj *et al.* en [69] la utilizan para testear

3.2 Herramientas de planificación de red: estado del arte

un nuevo modelo de canal radio, diseñado en su publicación, que emplea técnicas de antena MIMO. Mientras que Finn *et al.* investigan en [70] la reasignación de usuarios entre celdas adyacentes con el objetivo de reducir el número de celdas que permanecen activas mejorando por tanto la eficiencia energética.

3.2.2.2 LTE-SIM

El proyecto LTE-SIM [59] desarrolla una herramienta de planificación de red LTE de código abierto. Este simulador fue concebido para simular estrategias de “scheduling” en UL y DL en entornos Multi-Celda/Multi-Usuario teniendo en cuenta movilidad de usuarios, optimización de recursos radio, técnicas de reutilización de frecuencias y otros aspectos relevantes de LTE. Esta desarrollado en lenguaje “C++”. Modela tres tipos de Nodos de Red : UE, eNB y MME. Además implementa varios generadores de tráfico en el nivel de aplicación y desarrolla distintas estrategias de “scheduling”.

En cuanto a los resultados obtenidos en sus simulaciones, LTE-SIM proporciona una evaluación del rendimiento de los algoritmos de “scheduling” utilizados, dando resultados como tasa de pérdida de paquetes, retardos medios de paquetes, relación entre pérdidas de paquetes y velocidad de usuario , eficiencia espectral, etc., permitiendo una comparativa de los valores anteriores en función de la técnica de “scheduling” empleada.

La herramienta ha sido utilizada para la realización de diferentes estudios, entre los más recientes, Nguyen *et al.* [71] utilizan este simulador para realizar una comparativa entre un nuevo modelo de “scheduler” diseñado para mejorar la experiencia de usuario en servicios en tiempo real, como VoIP, con otros como Proportional Fair. Lin *et al.* [72] la emplean para simular un sistema en el que se trata de optimizar la realización de *handovers*.

Estos dos simuladores son prácticamente los únicos abiertos, tanto a nivel de licencia como de código que en la actualidad se encuentran disponibles. Ambos son simuladores complejos que ayudan a estudiar el comportamiento de una red LTE, si bien, los resultados obtenidos mediante ambos *no se adaptan a nuestras necesidades de estudio*. Nuestros requisitos parten también de un entorno Multi-Celda/Multi-Usuario, con diversas técnicas de “scheduling”. Pero además necesitamos tener en cuenta que los usuarios en cualquier red demandan distintos tipos de servicio, cada uno de ellos con tasas específicas de penetración de mercado y distintos valores en cuanto a regimen binario demandado y tamaños de descarga. Los resultados que necesitamos obtener van orientados principalmente a medir el tiempo en el que cada usuario del sistema con-

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

sigue descargar sus datos, permitiendo obtener valores medios de velocidad de descarga por usuario, por eNB y por servicio. El objetivo del análisis de estos resultados debe llevar a dar una estimación sobre si el número de eNB distribuidos inicialmente sobre un área de estudio es suficiente o es necesario ampliarlos de cara a conseguir satisfacer las necesidades puntuales de los usuarios. Estos resultados *no* se pueden obtener con las dos herramientas comentadas anteriormente. Por este motivo se planteó el desarrollo de una herramienta de planificación LTE que se adaptara a nuestras necesidades, distribuida en varios bloques fundamentales:

- Multiservicio.
- Multi-eNB.
- Técnicas de Scheduling.
- Análisis a nivel de TTI.

Mediante la integración de los bloques anteriores, junto con la base común que genera usuarios y eNB a la par que calcula los parámetros básicos de LTE, se permite obtener los resultados requeridos.

Dentro del objetivo general establecido, una de las contribuciones importantes de esta tesis se encuentra en el desarrollo de un módulo que sea capaz de realizar *la asignación o asociación de usuarios a celdas en LTE mediante un algoritmo evolutivo*. La revisión del estado del arte del problema de la asociación usuario-celda se realiza en la Sección 3.3, mientras que la revisión de la aplicación de estrategias de Computación Evolutiva en LTE se postpone, por claridad, a la Sección 3.4.

3.3 El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica

El problema de la asignación (u asociación) de usuarios a celdas se suele tratar en la literatura especializada empleando diferentes metodologías dependiendo de si la red es una red “convencional” formada por macro-celdas –con un proceso de despliegue convencional y con una densidad de usuarios mucho mayor que la de BSs– o de si se trata de redes emergentes del tipo Red Heterogénea –*Heterogeneous Network*– (HetNet) [34, 73, 74] o de la clase “Red Ultra Densa” –*Ultra Dense Network*– (UDN), en las que la

3.3 El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica

densidad de nodos puede ser del mismo orden de magnitud que la de usuarios, estando los nodos, por lo general, distribuidos al azar [75–77]. Como señalan Gotsis *et al.* [76], la *densificación* de la infraestructura que requiere el paradigma UDN se puede llevar a la práctica incrementando la densidad de nodos de “infraestructura” (desplegados por el operador) junto con la de los ANs (desplegados por usuarios) y los móviles de los usuarios funcionando como “*prosumers*”. Tal densificación de la red junto con la utilización de MIMO en regimen “masivo” son los dos aspectos que se prevé se conviertan en las piedras angulares de las redes de Quinta Generación –*Fifth Generation*– (5G) [76, 78–81], aumentando la capacidad en varios órdenes de magnitud [75, 76, 82]. La asignación de usuarios en UDNs es diferente de la de las redes de macro-celdas convencionales [76, 77]. Del mismo modo, el problema en HetNets –en el que las celdas “pequeñas” (pico, femto) de menor potencia, con un despliegue generalmente no planificado, están embebidas dentro del despliegue convencional de macro-celdas [83]– también es *diferente* de las redes de macro-celdas [73]. A este respecto, y aunque no es el objetivo esencial de esta tesis, en la parte experimental (Capítulo 7) se ha aplicado nuestro método a estas redes, para ilustrar la versatilidad de nuestra propuesta.

Lo que todas las redes mencionadas (tanto las basadas en macro-celdas, como las UDNs y HetNets) tienen en común es que la asociación usuario-celda tiene un *enorme impacto* en el rendimiento general de la red. Mientras que los operadores móviles utilizan actualmente enfoques *sub-óptimos* “convencionales” –basados en SINR o bien en Balanceo de Carga –*Load Balancing*– (LB)–, las investigaciones académicas se suelen centrar, muchas veces, en *modelos óptimos* pero basados en premisas *poco realistas* (o bajo condiciones muy difíciles de llevar a la práctica), *lo que impide su utilización por parte de los operadores* [84].

A este respecto, parece *necesario* elaborar una herramienta, *como la que se propone en esta tesis*, que sea capaz de: 1) plantear un *modelo* basado en hipótesis *realistas* –y *aplicable* a redes con cientos de usuarios por km^2 –; y 2) que, dada su complejidad computacional, se pueda resolver de forma *aproximada* (aunque con soluciones mejores que las ofrecidas por los métodos convencionales empleados en la actualidad por los operadores) mediante un EA que trabaje *off-line* en la fase de diseño y no en la de operación. Esta contribución de la tesis [36] resultaría especialmente práctica para los operadores ya que, como se ha motivado en el Capítulo 1, éstos necesitan incrementar sus ingresos en un ámbito de fuerte competencia en el que el aumento de beneficios se está desacelerando. Una forma de aumentar ingresos es disponer de herramientas novedosas que, como las que se proponen en esta tesis, permitan mejorar el dimensionado y simular, hasta qué punto, el despliegue de un nuevo nodo mejora las prestaciones del

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

usuario. El módulo de asignación usuario-celda, cuyos detalles –modelado del problema de asignación y EA propuesto– aparecen descritos en el Capítulo 5, es capaz de proveer esa información.

En la literatura especializada, la asociación de usuarios a celdas se suele modelar utilizando matrices cuyos elementos *binarios* codifican si un usuario está asociado o no a un nodo (estación base, nodo de acceso), convirtiéndose así en un problema de *optimización combinatoria* [73]. La solución exacta es esencialmente imposible, incluso para redes móviles de tamaño mediano. Sólo si la red es lo suficientemente pequeña, el problema de la asociación óptima de usuarios se puede solucionar empleando una búsqueda de fuerza bruta [85]. A pesar de esta complejidad computacional, hay algunos trabajos de investigación clave que han abordado, muy recientemente, este problema combinatorio con el fin de encontrar una solución, ya sea *relajando* las restricciones [85], o bien, mediante la *transformación* del problema en otra cuya solución óptima es menos difícil de encontrar.

En general, en redes de datos multi-celda, para realizar la asignación de usuarios a celdas, se suelen considerar dos *métricas* diferentes: la velocidad instantánea alcanzable en la capa física y la carga de las celdas [86]. Dado que la tasa binaria instantánea se calcula a partir del SINR recibido, la estrategia más simple –y más ampliamente aceptada en la industria– consiste en seleccionar la BS para la cual la correspondiente señal piloto en DL es la de mayor intensidad. Este método pertenece al conjunto de estrategias en la que la asignación usuario-celda se realiza en base a ciertas medidas de la calidad de la señal electromagnética recibida por el usuario. Estos métodos serán revisados en la Subsección 3.3.1. Sin embargo, en algunos casos, la técnica basada en SINR puede no ser lo suficientemente adecuada [86] en el sentido de que *no* considera el equilibrio de carga entre celdas. El segundo tipo de estrategias de asociación usuario-celda son precisamente aquellas que, en diversas formas, tienen en cuenta el balance de carga (LB) entre celdas. Precisamente, la Subsección 3.3.2 se encarga de realizar la correspondiente revisión bibliográfica.

3.3.1 Métodos de asociación usuario-celda basados en la calidad de la señal: revisión bibliográfica

Estas estrategias, aunque variadas, tiene en común el hecho de que están basadas en la utilización de métricas relacionadas, de una forma u otra, con la *intensidad de señal* [83, 87, 88]. En concreto, éstas son métricas basadas en la medida de la intensidad de una señal piloto enviada por cada estación base [73]. Una de estas métricas es el

3.3 El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica

mencionado SINR, que conduce al “esquema de asociación basado en SINR”, usualmente considerado como el método de referencia [83, 87]. En esta estrategia, cada usuario se asigna a la BS para la cual dicho usuario tiene el máximo (mejor) SINR.

Otra aproximación en este grupo es el método conocido por el acrónimo RSRP (*Reference Signal Received Power*), en el que la BS con la máxima potencia recibida de una señal de referencia es la seleccionada para la asociación. Como se muestra en [83], el método SINR suele representar la *calidad del canal* mucho mejor que el basado en RSRP.

También perteneciente a este grupo, el método de asignación usuario-celda basado en RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) es una estrategia en la cual cada usuario se asocia a la BS que maximiza la métrica de RSRQ (es decir, RSRP dividido por la energía total recibida). Básicamente, el esquema basado en RSRQ es similar al método basado en SINR [83]. La Ref. [89] contiene más detalles sobre estas estrategias.

Como se ha mencionado anteriormente, la *tasa binaria* es una de las métricas utilizadas en problemas de asignación de usuarios. Dado que la tasa de usuario es una función que depende del SINR recibido, el método de asociación más sencillo y más utilizado consiste en seleccionar la BS que proporciona la señal piloto de enlace descendente más fuerte [90]. Precisamente, en este aspecto, uno de los objetivos más frecuentemente empleados en la asignación de usuarios es la *maximización de las tasas de usuario* [91, 92]. En general, este problema implica una *optimización combinatoria*, asignando un número \mathcal{N}_U de usuarios a \mathcal{N}_B BSs ($\mathcal{N}_U \gg \mathcal{N}_B$ en redes convencionales) [85, 93, 94]. La complejidad de tipo “NP-hard” surge porque las tasas de todos los usuarios están *acopladas*: cuando se asigna un usuario a otra BS diferente, se producen cambios en las correspondientes SINRs, que, a su vez, modifican las tasas de los usuarios. Esto no es computable en tiempo finito, ni siquiera para redes de tamaño mediano. Como se discute en [85, 91], una aproximación de fuerza bruta a este problema combinatorio tiene una complejidad de $\mathcal{O}(\mathcal{N}_B^{\mathcal{N}_U})$.

Ésta es, precisamente, una de las razones que motiva la necesidad de elaborar una herramienta, *como la que se propone en esta tesis*, que sea capaz de: 1) modelar el problema de asociación usuario-celda en LTE basado en hipótesis *realistas*; y 2) resolverlo de forma *aproximada* (aunque con soluciones mejores que las ofrecidas por los métodos convencionales empleados en la actualidad por los operadores) mediante un EA [36].

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

3.3.2 Métodos basados en Balanceo de Carga: revisión bibliográfica

3.3.2.1 Visión global de las diferentes aproximaciones

Como argumenta Kim *et al.* en [90], el método de asignación de usuarios basado únicamente en SINR puede no ser el más adecuado, en el sentido de que no tiene en cuenta la carga real de las estaciones base. Para superar esta dificultad, se ha propuesto un segundo método convencional, el método LB, que consiste en la redistribución de usuarios entre células de forma proporcional a su capacidad [83], siendo [86, 91, 94–97] algunas de las referencias más interesantes, que se comentarán posteriormente.

Los trabajos de investigación que estudian el problema UCAP mediante técnica de LB se pueden categorizar en su mayor parte en dos clases genéricas [85]. La primera corresponde a aquellos métodos que se basan en el préstamo de canales desde celdas poco cargadas a aquellas que lo están más [98–101]. El segundo grupo, que es objeto de considerables investigaciones en la actualidad, consiste en aquellos enfoques basados en *transferir tráfico* (es decir, asignar usuarios) desde celdas altamente cargadas a aquellas que lo están menos.

Esta última estrategia, la asociación de usuarios a celdas basada en LB *mediante transferencia de tráfico*, incluye, a su vez, dos grandes sub-grupos de métodos encontrados en la literatura. Uno de ellos –que será discutido en 3.3.2.2 por su importancia y relación con nuestra propuesta– consiste en alcanzar el equilibrio de carga *transformando* el problema para que sea un problema de optimización convexa [85]. El otro grupo de métodos de asociación de usuarios basada en LB mediante transferencia de tráfico incluye otras estrategias [102–104] como la respiración celular [105, 106], sistemas de superposición de macro-células jerárquicas [107, 108], teoría de juegos [109–111], procesos de decisión de Markov [112, 113], y *biasing*. La referencia [73] es una lectura esencial y clara para poder obtener un mayor nivel de detalle sobre estos métodos. En el método *biasing* –que es el preferido por la industria y el 3GPP para derivar tráfico (usuarios asignados) a celdas menos cargadas– la potencia RSRP se escala artificialmente mediante un término de offset (que depende de la clase de estación base [73, 114]) con el objetivo de asignar usuarios a las estaciones base de celdas pequeñas más cercanas [34, 73]. El último método que se ha revisado en este grupo es el esquema de LB descrito en [115], en el que se ha desarrollado un algoritmo de LB que tiene como objetivo dividir la carga entre células (pequeñas) tan uniformemente como sea posible, sin degradar considerablemente la calidad del enlace.

3.3 El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica

3.3.2.2 Caso particular en LB: transformación del problema, optimización convexa, soluciones exactas y aproximadas: revisión

La otra estrategia de asociación de usuarios a celdas mediante la técnica LB mencionada en los párrafos previos está basada en transformar este problema en otro de optimización convexa [85]. En esta línea de investigación, que está recibiendo una notable atención en la actualidad, se explora la utilización de *familias* de “Funciones de Utilidad de Red”, U_α , parametrizadas por un parámetro α [116, 117] que permite ajustar el grado de equidad (*fairness*) en la asociación usuario-celda [86, 90, 91, 94, 95, 118, 119]. Como se explica en [120], una Función de Utilidad de Red –*Network Utility Function*– (NUF) debería ser una función cóncava y monótona creciente de tal forma que las tasas de usuario R_{u_l} elevadas deberían corresponderse con una mayor utilidad, con un mayor valor de la función NUF, $U_\alpha(R_{u_l})$. Para ilustrarlo mejor, supóngase un despliegue con un área de servicio \mathcal{A} con un conjunto de \mathcal{N}_B BSs, $\mathcal{B} = \{B_1, \dots, B_{\mathcal{N}_B}\}$, y un conjunto $\mathcal{U} = \{u_1, \dots, u_{\mathcal{N}_U}\}$ con \mathcal{N}_U usuarios. La notación “ $u_l \in B_k$ ” representa matemáticamente que el usuario u_l se asigna al eNB B_k . En este problema, un ejemplo de familia de NUFs podría ser de la forma [91]:

$$U_\alpha(r_{u_l}(\mathbf{M})) = \begin{cases} \frac{(r_{u_l}(\mathbf{M}))^{1-\alpha}}{1-\alpha} & , \alpha \geq 0, \alpha \neq 1 \\ \log(r_{u_l}(\mathbf{M})) & , \alpha = 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

donde

$$r_{u_l}(\mathbf{M}) = \sum_{k=1}^{\mathcal{N}_B} \frac{r_{u_l}^{Sha} m_{kl}}{1 + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq k}}^{\mathcal{N}_B} m_{kq}} \quad (3.2)$$

es la tasa binaria de bajada del usuario u_l , $r_{u_l}^{Sha}$ es la capacidad de Shannon, la tasa *máxima teórica* que se podría alcanzar,

$$r_{u_l}^{Sha} = \log_2(1 + \text{snr}_{lq}). \quad (3.3)$$

y \mathbf{M} es la matriz binaria de de orden $\mathcal{N}_B \times \mathcal{N}_U$, cuyos elementos codifican si un usuario u_l ha sido asignado o no al eNB B_k ,

$$m_{kl} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } u_l \text{ se asocia a } B_k (\Leftrightarrow u_l \in B_k) \\ 0 & , \text{ en otro caso} \end{cases} \quad (3.4)$$

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

restringido a la condición

$$\sum_{B_k} m_{kl} = 1, \forall u_l \in \mathcal{U}, \quad (3.5)$$

que establece que cualquier usuario u_l sólo puede ser asociado a un (1) eNB (Asociación Única de Usuario –*Single User Association*– (SUA) [121])

A este respecto, Kim *et al.* [86, 90] han propuesto una técnica de asociación usuario-celda tipo α -óptimo, que, relacionado con [117], es capaz de encontrar un *compromiso óptimo* entre la maximización de la tasa binaria de usuario y el balance de carga entre las BSs. Los trabajos de investigación de Kim *et al.* [86, 90] y los de Wildman *et al.* [91, 121] son especialmente interesantes debido a su tratamiento especialmente riguroso desde el punto de vista matemático. Estos trabajos tienen en común la utilización de un marco matemático unificado, en el sentido de utilizar una NUF, U_α , que depende de las tasas de los usuarios y que está parametrizada por el parámetro α , de forma similar a la Expresión (3.1). Debido a la relación parcial de [91] con nuestra propuesta [36], se muestra aquí –a efectos comparativos– la formulación de [91]. El problema de Maximización de la Utilidad de la Red –*Network Utility Maximization*– (NUM) es

$$\max_{\mathbf{M} \in \mathcal{M}} \sum_{l=1}^{N_U} U_\alpha(r_{u_l}(\mathbf{M})) \quad (3.6)$$

donde \mathcal{M} es el conjunto de todas las matrices de asignación \mathbf{M} .

La importancia práctica del parámetro α en las expresiones (3.1) y (3.6) consiste en que permite explorar *gradualmente* diferentes estrategias o políticas de asociación de usuarios. Esta formulación (de la que se pueden encontrar detalles en [86]), llamada “asociación de usuarios α -óptima”, proporciona una familia de objetivos de balance de carga dependiendo de los valores de α : éstos pueden ir desde 0 (*no* hay balance de carga) hasta ∞ (que correspondería con el balance de carga máximo, consiguiendo una utilización completamente igualitaria de las BSs). Entre medias de estos dos valores, hay un caso especialmente interesante, para $\alpha = 2$, que está parcialmente relacionado con nuestra propuesta: para una NUM con $\alpha = 2$, este método corresponde al método de *minimización del retardo* propuesto en [91], llegando a una estrategia de *retardo mínimo* [86, 90, 91, 121]. Este caso ha sido recientemente estudiado por Wildman *et al.* en dos importantes artículos [91, 121]. En concreto, en [91], el problema de asociación usuario-celda tendente a minimizar el retardo se formula inicialmente como una NUF cuadrática y no convexa. Para superar esta no-convexidad, los autores transforman el problema y consiguen una formulación lineal, que son capaces de resolver de forma *exacta*, por evaluación combinatoria *en una red extremadamente pequeña* (4 usuarios

3.3 El problema de la asignación de usuarios a celdas: revisión bibliográfica

and 4 BSs en un área de $100 \times 100 \text{ m}^2$).

Aunque aparentemente similar en concepto, el método de asignación usuario-eNB que se propone en esta tesis [36] difiere del planteado en [91] en que: 1) Las formulaciones combinatorias son diferentes (no usamos sumas de las tasas binarias); 2) Nuestra formulación, basada en minimizar la métrica DTS, incluye todos aspectos técnicos de LTE (esquemas de modulación y codificación, por ejemplo); 3) Resolvemos directamente el problema de forma *aproximada* mediante la aplicación de un EA *en redes reales* (con densidades de usuario del orden de varios cientos de usuarios por kilómetro cuadrado), mientras que [91] resuelve una *aproximación lineal* por evaluación combinatoria en una red muy pequeña.

Como una mejora de [91], Wildman *et al.* se centran de nuevo en el caso $\alpha = 2$ en [121]. Consideran la asignación uniforme de recursos (como en la presente tesis) y SUA, y mejoran [91] utilizando esquemas primal-dual de programación lineal [121]. Los autores señalan que este enfoque tiene una complejidad polinomial y evita la complejidad de exponencial de [91]. En vez de SUA, [85] ha utilizado una Asociación de Usuario Fraccionaria –*Fractional User Association*– (FUA), en la que cada usuario puede ser asociado a más de una BS al mismo tiempo. Esta estrategia, que utiliza una NUF de tipo logarítmico (como en la Exp. 3.1) en la formulación combinatoria del problema, soluciona la complejidad $\mathcal{O}(\mathcal{N}_B^{\mathcal{N}_U})$ utilizando una *relajación de restricciones* basada en dicha FUA. Esta relajación física lleva a un problema de optimización convexa que reduce la complejidad, y que permite a los autores encontrar una cota superior para el caso en el que cada usuario es asociado solo a una BS.

El reciente artículo [120] realizado por Bethanabhotla *et al.* también está basado en utilizar una α -NUF [122] en un problema NUM. De forma más concreta, la Ref. [120] formula la asociación usuario-celda *directamente*, como un problema NUM convexo para el enlace DL de una red inalámbrica heterogénea con MIMO *masivo* en las BSs. Esta aproximación resulta ser factible porque los autores de [120] explotan las simplificaciones del sistema que ocurren en el *régimen masivo* de MIMO. En este régimen, las tasas binarias instantáneas convergen a límites deterministas y fáciles de calcular, ya que *no* dependen de la asignación de usuarios. Esto se traduce en un *desacoplamiento* de la asignación y las tasas y se traduce en una simplificación enorme del problema NUM, que se hace convexo.

Gotsis *et al.* [76] han propuesto muy recientemente una estrategia para el problema de la asignación de usuarios en redes 5G de tipo UDN con MIMO masivo (donde las densidades de nodos de acceso y las de nodos de usuario pueden llegar a ser comparables o incluso iguales). [76] se centra en cómo proporcionar tasas de datos uniformemente a

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

lo largo de toda la red. El objetivo de diseño óptimo consiste en alcanzar la máxima tasa común (que a priori es desconocida) para todos los usuarios de la red. Esta propuesta consiste, al igual que los anteriores, en transformar el problema originalmente intratable en otro menos complejo. Explota el hecho ya mencionado de que, cuando una red está funcionando en el régimen masivo MIMO, las tasas no dependen de las asociaciones, lo que simplifica el problema. Esta formulación permite obtener una solución óptima del problema de asociación usuario-celda, con una complejidad razonable, utilizando herramientas de programación lineal entera. El modelo exacto obtenido, aunque no es factible para su implementación on-line (debido a su carácter combinatorio y centralizado), es sin embargo una herramienta útil para la etapa de diseño/dimensionado (precisamente la fase en la que se centra nuestra propuesta).

Por último, y en relación con la cuestión de si la estrategia es centralizada o descentralizada, es importante remarcar una vez más que las estrategias centralizadas son NP-hard, [91, 120, 123, 124]. Esto requiere el uso de técnicas de simplificación para grandes redes convencionales, como se muestra en [91]. Por ejemplo, [125] presenta una relajación de un problema centralizado de asociación de usuarios en otro que es casi cóncavo, proporcionando un límite superior del valor óptimo de la maximización de la suma original. Como ya se mencionó, Ye *et al.* [85] han explorado la viabilidad de un método de asignación de usuarios distribuidos basado en la descomposición primal-dual de un problema NUM, inicialmente centralizado. Kim *et al.* [90] también ha propuesto un algoritmo de asociación de usuarios iterativo y distribuido en el que usuarios y nodos toman decisiones por turnos, demostrando que esta técnica converge a la solución óptima del correspondiente problema de optimización centralizado.

En general, puede concluirse que el problema de la asociación de usuarios a celdas presenta el problema de que se aborda desde dos extremos muy distintos, dejando entre ambos *una laguna que la propuesta de esta tesis podría cubrir*. En un extremo, los operadores móviles utilizan enfoques convencionales *sub-óptimos* para asignar usuarios a celdas (basados, fundamentalmente, en SINR o bien en LB). En el otro extremo se encuentran las investigaciones académicas, que suelen centrarse en *modelos combinatorios óptimos* pero basados en hipótesis *poco realistas* o muy difíciles de llevar a la práctica (por ejemplo, redes muy pequeñas), *lo que impide su utilización por parte de los operadores*, debido a su gran complejidad computacional, inabordable en redes reales. Ese gap intermedio –entre soluciones exactas en redes muy pequeñas (en un extremo) y métodos convencionales aproximados en redes reales (en el enfoque de los operadores)– es precisamente el que esta tesis pretende solventar, al proponer un nuevo modelo de

asignación usuario-eNB, cuya resolución mediante un algoritmo evolutivo proporciona mejores resultados que los métodos convencionales en redes reales [36]. La Sección 3.4 siguiente se centra precisamente en la revisión bibliográfica de aquellos trabajos que aplican técnicas de Computación Evolutiva en redes LTE.

3.4 Algoritmos evolutivos en LTE: estado del arte

Con el objeto de facilitar la comprensión de la revisión efectuada en la Subsección 3.4.2, se ha decidido introducir en la Subsección 3.4.1 una muy breve introducción a los conceptos elementales de los algoritmos evolutivos. El lector especialista en éstos puede obviarla e ir directamente a la Subsección 3.4.2, centrada en su aplicación específica en problemas que aparecen en redes LTE.

3.4.1 Conceptos básicos de algoritmos evolutivos

Las técnicas de Computación Evolutiva [126] se inspiran en conceptos tomados de la Genética y de la Teoría de la Evolución e incluyen, entre otros, Algoritmos Genéticos [127, 128], Algoritmos Evolutivos [129–132], Programación Genética [133, 134] y Estrategias Evolutivas [135–138]. La reciente publicación [129] ofrece un resumen muy claro de los principios de funcionamiento de los algoritmos evolutivos y de su estado del arte [129].

Aunque la terminología actual reserva el término Algoritmo Genético –*Genetic Algorithm*– (GA) a aquellos algoritmos evolutivos que codifican sus soluciones mediante una cadena de bits [129, 137, 139], no hay unanimidad en la literatura y, con frecuencia, ambos términos, Algoritmo Genético y Algoritmo Evolutivo, se utilizan indistintamente, al menos *cuando se aplican a problemas en redes móviles*, como se demostrará en la revisión que sigue. Sin embargo, hay que dejar claro que, conceptualmente, un EA puede emplear cualquier tipo de codificación (representación) de las posibles soluciones candidatas (individuos) al problema.

Un algoritmo evolutivo es un técnica heurística que, inspirada en conceptos tomados de la Genética y la Teoría de la Evolución de Darwin, es capaz de resolver problemas matemáticos extremadamente complejos, que aparecen en ramas muy variadas de la ciencia y de la ingeniería. Su versatilidad hace que puedan emplearse en problemas de búsqueda y optimización en los que otros algoritmos convencionales suelen fracasar (al converger prematuramente a extremos locales) o necesitar demasiado tiempo [129–132].

De forma muy resumida, los algoritmos evolutivos están inspirados en mecanismos que aparecen en la naturaleza tales como las mutaciones, la reproducción sexual y en

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

el principio de supervivencia del más apto [140]. Empleando un enfoque más formal, Golberd, quien lo publicó en 1989 [141] (asentando la base científica de este tipo de estrategias), define los GAs como “*algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección y de genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorio, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas*” [141].

Por un lado, los algoritmos evolutivos se inspiran en la Genética: en la naturaleza las propiedades externas de un ser vivo (“fenotipo”) están codificadas mediante un conjunto de genes (“genotipo”). En los algoritmos evolutivos, una posible solución (“individuo”) al problema planteado se codifica (representa) mediante un “cromosoma” [129–132]. Un GA es un caso particular de EA en el cual los elementos del cromosoma son una cadena de bits.

Por otro lado, los algoritmos evolutivos toman prestados ciertos conceptos de la Teoría de la Evolución de Darwin. En ésta, los individuos pueden sufrir “mutaciones” o cambios aleatorios en su genotipo (por una radiación, por ejemplo, o por un simple error de copia [142]), que pueden traducirse en cambios en su fenotipo (tanto positivos como negativos). Si este cambio le permite adaptarse mejor al entorno, tendrá mayor probabilidad de reproducirse y dejar descendencia y, con ello, una cierta probabilidad de que esa cualidad se transmita a sus descendientes. A lo largo de varias generaciones, terminan perviviendo aquellos individuos mejor adaptados. El grado de adaptabilidad al entorno es conocido como *fitness* y, en este contexto, se suele hablar de la “supervivencia del mejor adaptado”. Otro aspecto esencial se encuentra en la reproducción sexual, que aumenta la variabilidad genética y, en definitiva, termina engendrando individuos con nuevos fenotipos que les permiten (o no) adaptarse al entorno [129–132].

Así, de forma muy resumida, un algoritmo evolutivo es un algoritmo bio-inspirado, basado en la existencia de una *población* de individuos (soluciones candidatas) que van evolucionando a lo largo de generaciones. En cada generación, a los cromosomas que representan a los individuos de la población se les aplican, con ciertas probabilidades, “operadores” de mutación, reproducción o cruce (*crossover*) y selección. El proceso se itera hasta que se alcanza una condición de parada. La condición de parada se produce normalmente cuando se ha alcanzado un número máximo de generaciones previamente fijado o bien cuando ha convergido a una solución que permanece constante a lo largo de varias generaciones. Los conceptos más importantes a destacar son [129–132]:

- Codificación de los individuos: El objetivo de la codificación es representar las

3.4 Algoritmos evolutivos en LTE: estado del arte

posibles soluciones (individuos) de una forma alternativa que facilite la resolución del problema. Como se ha mencionado, un GA es un caso particular de EA en el que la codificación de cada individuo se realiza mediante una cadena binaria.

- **Tamaño de la población inicial.** Un tamaño demasiado grande favorece la diversidad de las soluciones pero reduce la velocidad de convergencia. Un tamaño demasiado pequeño reduce el tiempo de convergencia, pero podría converger prematuramente a un extremo local, al ser el espacio de exploración demasiado reducido. La referencia [132] realiza una revisión de los compromisos entre exploración y explotación en algoritmos evolutivos. El tamaño de la población inicial se suele determinar mediante métodos empíricos.
- **Operador de selección.** Su objetivo es determinar qué individuos formarán parte de la próxima generación y cuáles no. Para ello se basa en el valor de “fitness” de cada individuo. Hay diferentes técnicas de selección, entre las que se encuentra la de la rueda de ruleta (“roulett-wheel”) [141]. En ésta se utiliza una distribución de probabilidad mediante la que, a cada uno de los individuos de la población, se le asigna una parte de la ruleta que es proporcional al fitness del individuo, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Un método alternativo es el de *ranking* [143], en el que los individuos se ordenan según su fitness y solo los k individuos con el mejor valor de fitness formarán parte de la siguiente generación. Ambas técnicas se denominan métodos proporcionales a la calidad. Otro método ampliamente usado es el de selección por torneo [144]. En este caso, en cada paso se selecciona el nuevo padre mediante un torneo que se establece entre z individuos seleccionados de forma aleatoria, siendo el nuevo padre el de mayor calidad. Es un muestreo con repetición. El proceso se repetirá hasta que la población de padres esté completa.
- **Operador de cruce.** Al igual que la reproducción sexual en la Naturaleza, un operador de cruce permite generar individuos con características nuevas (nuevas posibles soluciones) mediante el cruce o intercambio de genes entre sus progenitores. Su realización es probabilística. Se ejecuta con cierta probabilidad de cruce (P_c) que indica la frecuencia con la que se producen cruces entre los cromosomas progenitores. Inicialmente el valor dado fue del 60% [141], pero han surgido estudios de cómo adaptar estas probabilidades al estado del proceso genético [139]. Una implementación común consiste en la selección de dos individuos con una

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

probabilidad de cruce dada. Cada pareja de padres generará una pareja de hijos, con diferente información genética, que reemplazarán a los padres en caso de mejorar el “fitness” de ellos. La idea subyacente del cruce se basa en que, si se toman dos individuos correctamente adaptados al medio y se obtiene una descendencia que comparta genes de ambos, existe la posibilidad de que los genes heredados sean precisamente los causantes de la bondad de los padres.

- Operador de mutación. El objetivo de un operador de mutación es generar variabilidad genética y, por tanto, nuevas soluciones. La mutación del cromosoma que representa a un individuo provoca que alguno de sus genes, generalmente uno sólo, varíe su valor de forma aleatoria. Aunque se pueden seleccionar los individuos directamente de la población actual y mutarlos antes de introducirlos en la nueva población, la mutación se suele utilizar de manera conjunta con el operador de cruce. Primeramente se seleccionan dos individuos de la población para realizar el cruce. Si el cruce tiene éxito entonces uno de los descendientes, o ambos, se muta con cierta probabilidad P_m . La probabilidad de mutación es muy baja, generalmente menor del 1%, para evitar que el algoritmo se convierta en una búsqueda aleatoria.

3.4.2 Algoritmos evolutivos en LTE

El desarrollo de los sistemas de telecomunicaciones es fundamental en la evolución de la sociedad actual. Dentro de estos sistemas, las comunicaciones móviles desempeñan un papel destacado debido al elevado número de usuarios y los diferentes tipos de servicios cursados. El espectro electromagnético, entre otros, es un recurso de muy alto valor para las empresas de telecomunicaciones debido a su escasez y al elevado precio de las licencias para usarlo. Por lo tanto, hacer un uso eficiente del mismo ha sido una preocupación constante desde el inicio de las comunicaciones móviles. En este contexto, la optimización de la red de acceso es fundamental para el ahorro de costes de un operador, reduciendo el número de puntos de acceso a desplegar y asegurando una calidad de servicio adecuada a los usuarios mediante una asignación óptima de recursos.

La asignación de recursos a usuarios es un problema muy complejo, que se hace aún más difícil a medida que aumenta el número de eNB, o si aumenta el número de usuarios y de servicios. En este contexto se han empleado diversas técnicas de inteligencia computacional [145] para solucionar el problema de asignación y también para otros problemas de optimización complejos en el campo de las comunicaciones móviles, que van desde casos de diseño y planificación de la red [146, 147], a la asignación de recursos

3.4 Algoritmos evolutivos en LTE: estado del arte

a usuarios [148, 149], ubicación de estaciones base [150, 151], o de admisión de llamadas en redes de telecomunicaciones [152].

Si se centra la atención específicamente en el caso de redes LTE, la asignación de recursos es un problema clave, muy exigente, debido a que múltiples usuarios, sometidos a una variedad de condiciones de canal, compiten entre sí por los recursos limitados de LTE. Hay algunos trabajos que han aplicado GAs al problema de asignación de recursos en redes LTE, aunque con diferentes enfoques del que se propone en esta tesis. La mayoría de ellos tratan este problema en el enlace descendente [153–159], mientras que solo unas pocas investigaciones se centran en el enlace ascendente [160, 161]. Además de estos enfoques, hay otros trabajos de investigación que estudian también el problema de ahorro energético mediante el empleo de GAs, ya sea sobre la propia asignación de los recursos radio (por ejemplo, minimizando la potencia emitida) [159, 162–164], o sobre el despliegue de eNB [165, 166], o mediante redimensionado del número de eNB en Green LTE [167].

Continuando con las investigaciones realizadas sobre asignación de recursos en enlace descendente, [153] explora con éxito el uso de un GA para este fin, combinando técnicas convencionales de planificación de frecuencias [168, 169], con el uso de antenas semi-inteligentes que generan patrones de cobertura modificables. Específicamente, los GAs estudiados son capaces de coordinar los patrones de cobertura entre eNBs con el objetivo de minimizar las interferencias que sufren los usuarios en el borde de la celda (provenientes de celdas adyacentes). La viabilidad de los GAs también ha sido estudiada en *Multicast-Broadcast Single-Frequency Network* (MBSFN) sobre redes LTE [154]. El uso de MBSFN en LTE es importante debido a que permite aumentar la velocidad de descarga para el envío de contenidos multimedia como puede ser video o televisión en directo. El GA estudiado en [154] busca la solución óptima para el área de despliegue de MBSFN basándose en la distancia entre el área potencial y el porcentaje de usuarios de dicho servicio en tal área. Centrándose en los valores de CQI, el problema de asignación de recursos radio para múltiples usuarios en enlace descendente de redes LTE se ha tratado en [155], llegando a la conclusión que la propuesta con GA proporciona mejores resultados que otros enfoques, junto con una importante reducción de la complejidad. La diferencia con el tratamiento adoptado en [156] es que el GA trata de maximizar tanto la tasa total de velocidad de la celda como la tasa en el borde de la misma, mostrando cómo supera a los schedulers convencionales basados en un único compromiso entre optimizar la capacidad y el reparto justo de recursos.

Como se ha mencionado con anterioridad, solo unos pocos estudios han centrado su atención sobre el enlace ascendente: mientras [160] tiene como objetivo optimizar

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

la asignación de RBs en enlace ascendente por medio de un GA que maximiza la capacidad de canal usando información intercambiada por el interfaz X2, [161] explora la viabilidad de un algoritmo de scheduling basado en un GA que asigna recursos en el enlace ascendente. Los resultados muestran que con el GA se supera a los algoritmos más utilizados en la provisión de video con mayor calidad.

Dentro del grupo de publicaciones que tratan conceptos de eficiencia energética en redes LTE, [159] se puede clasificar como pertenecientes tanto a aquellos trabajos que se centran en la asignación de RBs como a los que incluyen criterios de ahorro energético. Específicamente, [159] investiga el diseño de un sistema de antenas adaptativas e inteligentes que combinan un GA y un algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas –*Particle Swarm Optimization*– (PSO) con el objetivo de maximizar la capacidad a la vez que se minimiza la potencia emitida y la interferencia inter-celda, modificando las ganancias de las antenas de los eNBs. Este enfoque alcanza notables mejoras en términos de cobertura, throughput y reducción de potencia emitida cuando se compara con las técnicas convencionales de ganancia de antena fija. La eficiencia energética, en términos de optimizar el consumo de potencia en redes LTE mediante el empleo de algoritmos evolutivos, se ha convertido recientemente en un tema importante [162–164]. Con respecto a éste, y también relacionado con problemas de multicast en LTE, [163] investiga el uso de un GA para optimizar el consumo de potencia de la red completa junto con asegurar una eficiencia espectral aceptable para la mayoría de usuarios, lo que se realiza mediante el ajuste de niveles de potencia en cada eNB. El aspecto distintivo del estudio [164] consiste en la propuesta de un GA que minimiza el consumo de energía apagando eNBs infrautilizados y optimiza la cantidad de energía consumida sin reducir la calidad de servicio requerida.

Finalmente, un último grupo de publicaciones relacionadas con el trabajo objeto de esta tesis lo forman los que estudian la asignación de recursos, incluyendo consumo de energía en el despliegue de eNBs [165, 166] o redimensionado del número de eNBs [167], los cuales han propuesto un GA para resolver el problema de determinar el número y la localización de eNBs minimizando la potencia emitida [165] o el coste de la red sin dejar de cumplir los requisitos de cobertura y capacidad [166]. Por último, [167] ha utilizado muy recientemente un GA para resolver el problema de redimensionar la configuración de eNBs en redes LTE basándose en restricciones de carga de tráfico y calidad de servicio. Los resultados obtenidos se han comparado con los alcanzados mediante técnicas de apagado/encendido de eNBs, llegando a la conclusión que el método propuesto tiene potencial para una reducción sustancial de demanda eléctrica.

Como se puede observar, hay algunos trabajos de investigación que buscan optimizar el mecanismo de scheduling que asigna recursos a los usuarios una vez que ya están en el eNB, pero, hasta donde sabemos, no hay trabajos que resuelvan el problema de asignación de usuarios a LTE minimizando el tiempo total de descarga y utilizando una codificación como la que nosotros hemos propuesto en [36]. Como ya se ha mencionado y como se verá a lo largo de esta tesis, el enfoque convencional más utilizado para asignar usuarios a eNBs consiste en asociar cada usuario al eNB para el cual dicho usuario tiene el mejor CQI. Esta estrategia puede no ser la forma más eficiente de asignar recursos en el dimensionamiento de redes, especialmente en áreas densamente pobladas.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha realizado una revisión del estado del arte para posicionar nuestra investigación y comprobar hasta qué punto es novedosa. Se ha analizado la bibliografía centrada en el dimensionamiento, la planificación, el problema de la asociación usuario-celda y la utilización de algoritmos evolutivos, todo ello dentro su aplicación específica a LTE.

En el análisis del estado del arte referido al dimensionamiento de la red LTE realizado en la Sección 3.1, se observa cómo, si bien desde el punto de vista de estudio de cobertura, los modelos estudiados suelen emplear la misma metodología, para el estudio de la capacidad usan diversas técnicas que requieren de una parametrización amplia y compleja. Por este motivo utilizan herramientas software comerciales en algunos casos y, en otros, se centran sobre aspectos muy concretos. Dichas simuladores *no* se adaptan a nuestras necesidades al no permitir la flexibilidad de la herramienta desarrollada en este trabajo. Por ello, en la presente tesis, se propone una herramienta software en MATLAB mediante la cual se calcula el número de eNB necesarios para dar cobertura a un área geográfica, en un entorno multiservicio y multiusuario. La herramienta implementada en la tesis permite la comparativa entre distintos tipos de área (Urbano Denso, Urbano, Sub-urbano y Rural) y el empleo de diferentes técnicas de scheduling. De la misma manera, la parametrización de la herramienta desarrollada en esta tesis es sencilla (en comparación con las descritas en la Sección 3.2) en lo que respecta a la introducción de parámetros de entrada y a la ubicación inicial de los eNB. Se considera además un modelo multiservicio y multiusuario en el que se garantiza el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga mínima de servicio. Para ello, la herramienta calcula la velocidad media de los servicios ofertados teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNB, calculados previamente,

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios implantados, entonces se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento se añaden eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

Además, como se comprobará, el resultado obtenido con nuestra herramienta no se puede conseguir con las herramientas analizadas, desde el punto de vista de la necesidad de obtener el tiempo de descarga total de los usuarios del sistema y, por lo tanto, el rendimiento medio. La optimización de esta salida, mediante una asignación de usuarios a eNB distinta a la convencional, basada en CQI, será objeto de la implementación del EA que se describirá en el Capítulo 5.

En lo que respecta a la revisión bibliográfica del problema de la asociación de usuarios a celdas realizada en la Sección 3.3, en general, puede concluirse que este problema se aborda desde dos extremos muy distintos, dejando entre ambos una laguna que la propuesta de esta tesis podría cubrir. En un extremo, los operadores móviles utilizan enfoques convencionales *sub-óptimos* –basados en SINR o bien en LB. En el otro extremo se encuentran las investigaciones académicas, que suelen centrarse en *modelos óptimos* pero empleando hipótesis *poco realistas* o muy difíciles de llevar a la práctica (por ejemplo, redes muy pequeñas), *lo que impide su utilización por parte de los operadores*. Ese gap intermedio –entre soluciones exactas en redes muy pequeñas (en un extremo) y métodos convencionales aproximados en redes reales (en el enfoque de los operadores)– es precisamente el que esta tesis pretende solventar, al proponer un nuevo modelo de asignación cuya resolución mediante un algoritmo evolutivo proporciona mejores resultados que los métodos convencionales en redes reales [36]. Sí que se ha comprobado que hay aproximaciones *similares* (aunque diferentes en concepto) [76, 84, 91, 115, 120, 121] dentro del campo genérico de aplicación de las redes móviles. Mientras que la investigación de esta tesis se centra en encontrar una solución *aproximada* al problema UCAP en LTE mediante la *minimización* de la métrica DTS utilizando un EA, la Ref. [84] se centra en encontrar una solución también cuasi-óptima para el problema de la asignación de usuarios a puntos de acceso de redes WiFi mediante la minimización del ratio de satisfacción de los usuarios (el recíproco de la carga) mediante un algoritmo greedy. La propuesta investigada en esta tesis difiere de [76, 86, 90, 91, 121, 170] en el hecho de que éstas *transforman* el problema original, que es intratable computacionalmente, en otro que se puede resolver de forma exacta con un coste computacional menor (pero aún extremadamente elevado) en redes muy pequeñas. Finalmente, nuestro método difiere de [91], el más similar en concepto, en que: 1) La formulación combinatoria es diferente; 2) Nuestra formulación basada en la novedosa métrica DTS incluye todos los aspectos técnicos de LTE; 3) Nuestra propuesta [36] resuelve el problema de una forma aproxi-

mada mediante la aplicación de un EA en *redes de tamaños realistas* (con densidades de usuarios que pueden ser del orden de varios centenares de usuarios por km^2), mientras que la propuesta [91] obtiene una solución exacta mediante evaluación combinatoria de una aproximación lineal del problema en una *red extremadamente pequeña*.

Finalmente, en la revisión realizada en la Sección 3.4 se ha mostrado cómo hay algunos trabajos que han aplicado técnicas evolutivas al problema de asignación de recursos en redes LTE, aunque con diferentes enfoques del que se propone en esta tesis. La mayoría de ellos tratan problemas en el enlace descendente [153–159], mientras que solo unas pocas investigaciones se centran en el enlace ascendente [160, 161]. Además de estos enfoques, hay otros trabajos de investigación que estudian también el problema de ahorro energético, ya sea sobre la propia asignación de los recursos radio (por ejemplo, minimizando la potencia emitida) [159, 162–164], o sobre el despliegue de eNB [165, 166], o mediante redimensionado del número de eNB en Green LTE [167]. De entre ello, hay algunos trabajos de investigación que buscan optimizar el mecanismo de scheduling que asigna recursos a los usuarios *una vez que ya están en el eNB*, hasta donde sabemos, no hay ningún trabajo que resuelva el problema de asignación de usuarios a LTE minimizando el tiempo total de descarga y utilizando una codificación como la que nosotros hemos propuesto en [36]. Como ya se mencionó, y se verá con mayor detalle en este trabajo, el enfoque convencional más utilizado consiste en asignar los usuarios al eNB respecto al que tengan un valor más alto de CQI. Esta estrategia no es la más eficiente sobre todo en entornos con alta densidad de población.

En conclusión, la revisión bibliográfica efectuada en el presente capítulo sugiere que, hasta dónde se ha podido comprobar que: 1) *No hay ningún trabajo* que aborde el problema de la asignación de usuarios a eNB con el objetivo de minimizar el tiempo total de descarga del sistema mediante un EA en el ámbito específico de LTE; y 2) Se necesita una herramienta software de planificación estratégica de red LTE, que exhiba una parametrización más sencilla (que las herramientas existentes), y que sea lo suficientemente flexible para: 2.1) Calcular el número de eNB necesarios para dar cobertura a un área geográfica, en un entorno multiservicio y multiusuario; 2.2) Analizar el rendimiento en distintos tipos de entornos (Urbano Denso, Urbano, Sub-urbano y Rural) y con diferentes técnicas de scheduling; 2.3) Calcular la velocidad media de los servicios ofertados teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios y comprobar si se cumple o no el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios implantados, añadiendo, en caso necesario, eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Capítulo 4

Objetivos y contribuciones

Gracias a las conclusiones extraídas de los capítulos previos –aspectos técnicos de LTE (Capítulo 2) y revisión bibliográfica (Capítulo 3)– se ha llegado ahora a un punto en el que se puede *delimitar de forma específica los objetivos y contribuciones* de la presente tesis.

4.1 Objetivos detallados

La revisión del estado del arte efectuada en el Capítulo 3 ha arrojado, entre otras conclusiones, que la planificación de las redes LTE exhibe una gran *complejidad* que es objeto de intensa investigación (Sección 3.1). Esa complejidad hace que la planificación, optimización y análisis del rendimiento de una red LTE requiera entornos de simulación muy complejos. En la mayor parte de los casos, estos simuladores suelen ser herramientas comerciales, específicas del fabricante y de entornos cerrados (Sección 3.2). Esto dificulta su utilización por parte de la comunidad académica. Además, *no* son lo suficientemente flexibles como para estudiar efectos que, a priori, podrían ser de interés científico.

Así, el *objetivo* de esta Tesis consiste en el diseño, implementación y prueba de algoritmos, tanto *convencionales* –utilizados actualmente en la industria– como otros basados en *Computación Evolutiva*, que constituyan una contribución novedosa a la *planificación sistémica* de redes móviles de cuarta generación (4G) y, en particular, de las redes LTE.

En concreto, se ha desarrollado una herramienta software en MATLAB mediante la cual se calcula el número de eNB necesarios para dar cobertura a un área geográfica en un entorno multi-servicio y multi-usuario. Permite la comparativa entre distintos

4. OBJETIVOS Y CONTRIBUCIONES

tipos de área (Urbano Denso, Urbano, Sub-urbano y Rural) y el empleo de diferentes técnicas de scheduling¹. De la misma manera, la parametrización de la herramienta desarrollada en esta tesis es sencilla, comparativamente con las descritas en el apartado 3.2, en cuanto a la introducción de parámetros de entrada y ubicación inicial de los eNB. Se considera además un modelo multiservicio y multiusuario en el que se garantiza el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga mínima de servicio. Para ello se calcula la velocidad media de los servicios ofertados teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNB, calculados previamente, se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios implantados se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento se añaden eNB de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

Como se verá con más detalle en el Capítulo 6, el diseño de una herramienta software con las características mencionadas es *complejo*, motivo por el que se ha estructurado en *módulos específicos*, que implementan herramientas novedosas que permitan tratar la complejidad mencionada de forma más eficiente que la que se consigue con las técnicas y/o herramientas encontradas en la revisión bibliográfica efectuada en el Capítulo 3.

Con todo ello en mente, las *contribuciones* de esta tesis son las siguientes.

4.2 Contribuciones

Contribución 1: Se ha implementado un simulador que permite analizar el comportamiento del sistema y realizar el dimensionado de una red LTE en un entorno multi-servicio y multi-usuario. El simulador permite ejecutar las siguientes funciones:

- Cálculo de RLB.
- Análisis del sistema en base a cobertura.
- Estimación de capacidad de la celda.
- Estimación del número de eNB necesarios.
- Asignación de los recursos disponibles en cada TTI, teniendo en cuenta un número de usuarios (con unas condiciones de recepción determinadas en términos de CQI).
- Implementación de distintos algoritmos de “scheduling” (Round Robin, Best CQI y Proportional Fair).

¹Utilizamos la palabra en inglés por ser la más empleada.

- Interfaz de usuario sencillo y fácil de usar y que permita una parametrización adecuada del entorno.
- Implementación de un algoritmo EA que permita la asociación de los terminales a los nodos B de manera que se consiga una asignación óptima en términos de cobertura y minimización del tiempo total de descarga del sistema.

En particular, dentro de este contexto, el problema de la asignación de usuarios a eNBs (o *asociación usuario-celda*, en una terminología más general aplicada en redes inalámbricas) tiene una gran importancia práctica, tanto desde el punto de vista de la industria como desde el académico. En la revisión efectuada en la Sección 3.4 se ha detectado que *no* existe ninguna investigación que se centre en incluir los aspectos técnicos de LTE en el problema mencionado. Es precisamente en el *problema de asociación usuarios-eNBs* donde esta tesis hace otra de sus contribuciones importantes: en [36] hemos publicado nuestra aproximación al problema. Consiste ésta en tratar el problema de la asignación de usuarios a nodos eNB con *dos contribuciones novedosas*:

Contribución 2: La primera reside en el propio *planteamiento* del problema. En esta tesis se propone realizar la asociación usuario-celda mediante la minimización de una *función* de coste novedosa: “Download Time of the complete System” (DTS), definida como el tiempo mínimo requerido por *todos* los usuarios del sistema para completar sus respectivas descargas. Como hemos publicado en [36], esta estrategia ayuda a que la red utilice sus recursos de una forma más eficiente (que los métodos convencionales), asignando usuarios desde unas celdas (que, en otro caso estarían sobrecargadas –cuando se emplea un modelo convencional de asignación basado en SINR–) a otras que están menos cargadas. El problema de la asociación usuario-celda es, en general, un problema combinatorio de tipo NP-hard [85, 93, 94]. La estrategia más utilizada consiste en asignar cada usuario a la Estación Base –*Base Station*– (BS) para la cual tiene mejor SINR [83, 87]. A su vez, la métrica más utilizada para realizar la asignación en los métodos convencionales (como los basados en SINR) es la *tasa binaria* de usuario, que es la función que se pretende maximizar para realizar la asignación usuarios-celdas [91, 92]. La razón de la complejidad computacional de este problema se encuentra en que las tasas de todos los usuarios están *acopladas*: cuando se asigna un usuario a otra BS, la relación SINR de cada usuario cambia, lo que, de nuevo, modifica las velocidades binarias. Este tipo de formulación encierra un problema de optimización combinatoria al asignar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B BSs ($\mathcal{N}_U \gg \mathcal{N}_B$ [85, 93, 94]). Este

4. OBJETIVOS Y CONTRIBUCIONES

no se puede calcular en tiempo finito, incluso en redes de tamaño medio [85, 91]: una aproximación de fuerza bruta tiene una complejidad $\mathcal{O}(\mathcal{N}_B^{\mathcal{N}_U})$. Las otras estrategias encontradas en la revisión de la literatura (Sección 3.4.2) tratan esta complejidad transformando el problema en *otro* cuya solución *óptima* es menos compleja (pero teniendo aún un coste computacional extremadamente elevado) [85]. En contraposición a esos relevantes trabajos, el enfoque adoptado en esta tesis es tratar *directamente* el problema (no una versión transformada) buscando una solución *aproximada*.

Contribución 3: Precisamente, el algoritmo para encontrar tal solución aproximada es la segunda contribución de esta tesis al problema de asociación de usuario-eNB [36]. Consiste ésta en encontrar una solución casi-óptima del problema *minimizado directamente* la función DTS *mediante un algoritmo evolutivo* (EA), cuyos aspectos novedosos hemos publicados en [36]. Aunque se verá con más detalle en el Capítulo 5, las principales contribuciones de nuestro EA son:

1. Una codificación novedosa de las soluciones candidatas.
2. Una población inicial adaptada al problema (en la que parte de las soluciones son soluciones proporcionadas por métodos convencionales) y que favorece la convergencia.
3. Operadores adaptados al problema.

Para verificar la viabilidad de la aproximación propuesta, el trabajo experimental de esta tesis contiene un conjunto de simulaciones suficientemente variadas, tanto en entornos realistas como en situaciones límite. En general se prueba que el método investigado en esta tesis consigue una mejor asignación de usuarios que los métodos convencionales –tanto los basados en SINR como los que utilizan LB–, y tanto en entornos convencionales (con $\mathcal{N}_U \gg \mathcal{N}_B$ como en otros –como, por ejemplo, las redes emergentes tipo UDN– donde \mathcal{N}_U y \mathcal{N}_B son comparables [76]).

La investigación desarrollada en esta parte de la tesis se engloba dentro del conjunto de tareas de dimensionado y no en la parte operativa, de forma que el algoritmo evolutivo propuesto es un algoritmo *off-line* que puede utilizarse para mejorar las labores de toma de decisión para realizar la actualización y/o dimensionado de redes LTE.

Una vez que se han establecido delimitado más claramente objetivos técnicos de la tesis utilizando las conclusiones extraídas de la revisión bibliográfica, la estructura del resto de la Memoria de Tesis Doctoral es como sigue.

4.3 Estructura de la Parte II de la Memoria de Tesis Doctoral

Con estos objetivos, el resto de la Parte II de la Memoria de Tesis Doctoral, se centra en *una descripción y discusión pormenorizada de las contribuciones y de los resultados obtenidos*. La Parte II contiene los siguientes capítulos:

- El Capítulo 5 se centra en: 1) Modelar el problema de asignación de usuarios a eNBs como un problema de optimización combinatoria en el que se minimiza la nueva métrica DTS; 2) Diseñar un EA que aborda ese problema de minimización de forma aproximada, y cuyos detalles más específicos se pueden encontrar en [36]. Esta doble contribución asigna usuarios a eNBs de forma más eficiente que los métodos convencionales (como se verá en el Capítulo 7).
- El Capítulo 6 detalla cómo funciona la herramienta de planificación LTE. La herramienta desarrollada en esta Tesis está compuesta por distintos bloques funcionales implementados en forma de funciones en MATLAB. La comunicación entre ellos se lleva a cabo mediante parámetros de entrada y salida. Cada bloque funcional realiza una determinada tarea dentro del proceso de dimensionado de red, desde la generación de usuarios hasta la asignación de recursos a usuarios con una determinada estrategia de *scheduling*.
- El Capítulo 7 justifica, describe y discute el trabajo experimental realizado utilizando la herramienta descrita en los capítulos 5 y 6. Las simulaciones concluyen que el método investigado en esta tesis funciona mejor que los algoritmos convencionales utilizados por los operadores en entornos reales caracterizados por un elevado número de usuarios. También se comprueba su viabilidad en entornos que simulan redes UDNs.
- El Capítulo 8 resume, finalmente, las conclusiones de las investigaciones realizadas en esta tesis doctoral y sugiere futuras líneas de investigación.

4. OBJETIVOS Y CONTRIBUCIONES

Parte II

Contribuciones, simulaciones y resultados numéricos

Capítulo 5

Asignación de usuarios a celdas en LTE: modelado y solución mediante un algoritmo evolutivo

El presente capítulo es un resumen de la investigación que hemos publicado en [36]. Este artículo presenta, de forma *condensada*, nuestras contribuciones al “Problema de Asociación Usuario-Celda” –User-Cell Association Problem– (UCAP) en LTE. Aunque se verá con mayor detalle a continuación, sí que resulta práctico, para *organizar mejor* el capítulo, adelantar aquí que esas contribuciones son: 1) *planteamiento* nuevo del problema UCAP en LTE; 2) *solución* novedosa de éste mediante un algoritmo evolutivo –*Evolutionary Algorithm*– EA; y 3) *demonstración* de la viabilidad del modelo y del EA mediante un conjunto amplio y variado de *simulaciones* en entornos reales como aquellos a los que habitualmente se enfrentan los operadores.

A diferencia del artículo [36], el presente capítulo, siguiendo las motivaciones y la línea argumental establecida en el Capítulo 1, describe *sólo* nuestra propuestas para tratar el problema UCAP en LTE (planteamiento o modelado y solución mediante un EA), mientras que la discusión de los resultados experimentales queda reservada para el Capítulo 7. La razón se encuentra, tal y como se ha expuesto en el Capítulo 1, en que estas contribuciones se inscriben dentro del *objetivo más amplio* de obtener una herramienta de simulación para la planificación en LTE (cuyos detalles últimos se reservan para el Capítulo 6), siendo el EA para asignación de usuarios a eNBs uno de sus módulos.

El resto del presente Capítulo se estructura de la siguiente forma. La Sección 5.1 describe la motivación, el posicionamiento con respecto a la bibliografía relacionada

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

y las contribuciones de nuestra investigación del problema UCAP en LTE. A continuación, la Sección 5.2 establece nuestra nueva métrica, “Tiempo de descarga total del sistema” o DTS (*Download Time of the complete System*) y, aplicando el concepto DTS, describe matemáticamente el problema de asignación de usuarios en las redes LTE. Una vez planteado el problema, que tiene una gran complejidad computacional, la Sección 5.3 se centra en discutir los detalles del algoritmo evolutivo propuesto para resolver este problema que, por métodos convencionales, sería intratable. Los aspectos del EA que se tratan en la Sección 5.3 son: codificación novedosa del individuo (asociación usuarios-eNBs), una población inicial que favorece la rápida convergencia, y unos operadores adaptados a la codificación propuesta. Finalmente, la Sección 5.4 describe sus perspectivas prácticas, mientras que la Sección 5.5 resume el capítulo.

5.1 Motivación, posicionamiento y contribuciones

5.1.1 Motivación

La investigación de esta tesis sobre la asignación de usuarios a eNBs en LTE está motivada fundamentalmente por dos razones.

La primera motivación es que, como se ha comprobado en la revisión del estado del arte efectuada en el Capítulo 3, *no* hay ningún trabajo similar al que hemos publicado en [36]. El enfoque *convencional* más utilizado para este problema consiste en asignar cada terminal de usuario al eNB para el cual su CQI (*Channel Quality Indicator*) es máximo. En cambio, y por razones que quedarán claras más adelante, en este capítulo se desarrolla una estrategia diferente y *novedosa* en *dos aspectos* fundamentales. Por un lado, se propone un modelo de asignación de usuarios a eNBs basado en la minimización de una nueva función de coste denominada “Tiempo de descarga total del sistema” – *Download Time of the complete System*– (DTS). Este parámetro se define como el *tiempo mínimo* requerido para que *todos* los usuarios del sistema completen sus descargas. Esta estrategia ayuda a que la red utilice sus recursos de forma más eficiente, balanceando la carga mediante la asignación de usuarios desde celdas que, de otra forma, estarían muy cargadas (comprometiendo la satisfacción *global* de los usuarios) a otras con menos carga. Por otro lado, la segunda contribución novedosa de esta tesis a la resolución del problema planteado consiste en minimizar DTS mediante un EA especialmente adaptado a este problema (en su codificación, población inicial y operadores). Los resultados de este trabajo se han publicado en [36], donde el lector interesado puede encontrar más detalles.

5.1 Motivación, posicionamiento y contribuciones

La segunda motivación de esta investigación es que *los operadores necesitan aumentar sus ingresos* (cuyos crecimientos se desaceleran –Capítulo 1–) y financiar al mismo tiempo nuevos despliegues. El modelo y el método propuesto podrían contribuir a ello, al ser una herramienta útil para la toma de decisiones tendentes a la mejora de la rentabilidad de la red (mediante el despliegue de nuevos eNB para cumplir con la demanda de tráfico cada vez mayor). Se debe ello a que ésta permite a los operadores *estimar en qué cuantía* mejoran las prestaciones (y, por tanto, la experiencia de usuario) cuando se añade potencialmente un nuevo eNB. El EA tiene utilidad no solo académica sino también práctica debido a que está concebido para su utilización *off-line*. A este respecto se debe recordar que la implementación se dirige a la fase inicial de *dimensionado* de la red LTE y *no* a la etapa de operación de la misma. De hecho, como se podrá observar en el Capítulo 7 –y ya dentro del contexto global de la de la herramienta de simulación para planificación LTE (Capítulo 6)– su *viabilidad* se ha comprobado en entornos reales como aquellos a los que se enfrentan los operadores. Los resultados sugieren que el método propuesto supera a los enfoques convencionales basados en SINR y en *balanceo de carga*, especialmente en entornos urbanos y urbanos densos (donde la asignación es más crítica en términos de capacidad).

5.1.2 Posicionamiento de la propuesta en la literatura especializada

Tal y como se ha discutido en la revisión bibliográfica efectuada en el Capítulo 3, la investigación objeto del presente capítulo se posiciona a caballo entre dos conjuntos de trabajos: por un lado, los que tratan el problema de la asociación usuario-celda en redes multi-celda y, por otro, los que aplican algoritmos evolutivos a problemas en LTE.

5.1.2.1 El problema genérico de la asociación usuario-celda en redes multi-celda

Por un lado, el problema teórico de la asignación de usuarios a las BS [90] o Puntos de Acceso, *Access Points*– (AP) [84] es común a muchas redes celulares inalámbricas, con independencia de la tecnología y/o terminología empleada. En general, el término asociación usuario-celda es el más empleado, aunque se utilizan otros como “asignación de usuario” (*user assignment*) o “problema de asociación de usuario” (*user association problem*), aunque, de acuerdo con [83], también recibe otras denominaciones como las de asociación de celdas o de selección de celda [171, 172], dependiendo de la tecnología utilizada.

Independientemente de la terminología empleada, la *asociación usuario-celda* en

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

redes multi-celda está basada, fundamentalmente, en dos parámetros: el régimen binario alcanzable (en la capa física) y la carga de la celda [86]. Dado que el régimen binario se calcula a partir de la SINR recibida, la técnica de asignación usuario-celda más simple (y por lo tanto más ampliamente aceptada) es el método “basado en SINR”, considerado, por lo general, como la técnica de referencia en la industria [83, 87]. En el caso particular de LTE, este enfoque convencional asigna los usuarios a eNBs [11, 16] basándose en CQI, parámetro que está directamente relacionado con SINR [11]. Un UE (o simplemente, usuario) se asocia al eNB para el que tiene mejor CQI (máximo SINR). Sin embargo, en algunos casos, esta estrategia podría no ser la más adecuada, en el sentido de que no tiene en cuenta el balanceo de carga entre celdas. Si la carga de la celda no se tiene en cuenta, el método de asignación adoptado podría hacer que algunos eNBs estuvieran muy cargados, e incluso saturados, mientras que otros en el mismo área podrían estar infrautilizados. Las celdas altamente cargadas proporcionarían un bajo régimen binario por usuario, lo cual se percibirá como una baja calidad de servicio.

Dentro de este posicionamiento, y atendiendo a la revisión de la literatura que se ha realizado en el Capítulo 3, se ha llegado a la conclusión de que *no* existe ninguna publicación que trate el problema UCAP en LTE con el objetivo de minimizar el tiempo de descarga de todos los usuarios (como un todo) mediante el empleo de un EA como el que hemos propuesto en [36]. Sí que se ha comprobado que hay aproximaciones *similares* (aunque diferentes en concepto) [76, 84, 91, 115, 120, 121] dentro del campo genérico de aplicación de las redes móviles. En particular, es importante recordar que:

- Mientras que la investigación de esta tesis se centra en encontrar una solución *aproximada* al problema UCAP en LTE mediante la *minimización* de la métrica DTS utilizando un EA, la Ref. [84] se centra en encontrar una solución también cuasi-óptima para el problema de la asignación de usuarios a puntos de acceso de redes WiFi mediante la minimización del ratio de satisfacción de los usuarios (el recíproco de la carga) mediante un algoritmo *greedy*.
- La investigación objeto de este capítulo difiere de la de [76, 86, 90, 91, 121, 170] en el hecho de que éstas *transforman* el problema original, que es intratable computacionalmente, en otro que se puede resolver de forma exacta con un coste computacional menor (pero aún extremadamente elevado). En concreto, el enfoque de este capítulo resuelve directamente el problema combinatorio (sin transformarlo en otro) de forma aproximada mediante un EA.
- La presente investigación difiere de la efectuada muy recientemente en el trabajo

[91], el más similar en concepto, en que: 1) La formulación combinatoria es diferente; 2) Nuestra formulación basada en la novedosa métrica DTS incluye todos los aspectos técnicos de LTE; 3) Nuestra propuesta [36] resuelve el problema de una forma aproximada mediante la aplicación de un EA en *redes de tamaños realistas* (con densidades de usuarios que pueden ser del orden de varios centenares de usuarios por km²), mientras que la propuesta [91] obtiene una solución exacta mediante evaluación combinatoria de una aproximación lineal del problema en una *red extremadamente pequeña*.

Además de estos trabajos centrados en el problema teórico UCAP en redes multicelda, hay, como se ha mencionado, otro grupo de trabajos de investigación con los que nuestra propuesta tiene cierta relación: la utilización de algoritmos evolutivos en LTE.

5.1.2.2 Algoritmos evolutivos en LTE

Tal y como se ha discutido en la revisión bibliográfica efectuada en el Capítulo 3, en la Sección 3.4, hay algunos trabajos que han aplicado técnicas evolutivas al problema de asignación de recursos en redes LTE, aunque con diferentes enfoques del que se propone en esta tesis. La mayoría de ellos tratan problemas en el enlace descendente [153–159], mientras que solo unas pocas investigaciones se centran en el enlace ascendente [160, 161]. Mientras [160] tiene como objetivo optimizar la asignación de RBs en enlace ascendente por medio de un GA que maximiza la capacidad de canal usando información intercambiada por el interfaz X2, [161] explora la viabilidad de un algoritmo de scheduling basado en un GA que asigna recursos en el enlace ascendente. Los resultados muestran que con el GA se supera a los algoritmos más utilizados en la provisión de video con mayor calidad. Además de estos enfoques, hay otros trabajos de investigación que estudian también el problema de ahorro energético, ya sea sobre la propia asignación de los recursos radio (por ejemplo, minimizando la potencia emitida) [159, 162–164], o sobre el despliegue de eNB [165, 166], o mediante redimensionado del número de eNB en Green LTE [167]. La conclusión general es hay unos pocos trabajos que buscan optimizar el mecanismo de scheduling que asigna recursos a los usuarios *una vez que ya están en el eNB* (por ejemplo, [161], en el enlace ascendente), pero, hasta donde sabemos, no hay ningún trabajo que resuelva el problema de asociación usuario-eNB en LTE minimizando el tiempo total de descarga y utilizando una codificación como la que nosotros hemos propuesto en [36].

La conclusión final a la que se llega tras la revisión bibliográfica de [36] o la realizada

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

en el Capítulo 3 de la presente Memoria de Tesis es que *no* existe ningún trabajo –ya sea en la industria o en el mundo académico– que: 1) modele el problema UCAP en LTE minimizando el tiempo de descarga *de todos los usuarios* (lo que introduce cierta equidad en el reparto de recursos); y 2) le resuelva mediante EA –con una codificación y población inicial novedosas– como el que hemos propuesto en [36]. El objetivo y las contribuciones específicas que aporta la investigación que describiremos en el presente capítulo aparecen son como sigue.

5.1.3 Objetivo y contribuciones

Debido a que los servicios multimedia son servicios de un elevado consumo, en términos de Mbps, y muy exigentes de recursos en el enlace descendente, el tiempo necesario para descargar los datos correspondientes (por ejemplo, un video) para *todos* los usuarios en el sistema ha sido probado en [36] como una medida o métrica adecuada para el rendimiento. En esta tesis, y como se introducirá en la Sección 5.2, este tiempo se denomina “DTS”. La minimización de la métrica DTS para todos los usuarios *colectivamente* establece *cierta equidad* en la distribución de los recursos disponibles entre los usuarios, aspecto que es objeto de investigación muy reciente, aunque con un tratamiento distinto basado en la utilización de familias de NUFs (*Network Utility Functions*) parametrizadas por un parámetro α que gradúa el nivel de equidad de la asociación usuario-celda [76, 86, 90, 91, 121, 170]. Para más detalles en este respecto, el lector interesado puede recurrir a la Subsección 3.3 del Capítulo 3 o bien a la referencia [36]. Se debe enfatizar que la minimización de este tiempo de descarga es colectiva para todos los usuarios en el área de servicio completa y *no* sólo para los usuarios con *mejores condiciones radio*, que, como se verá, es el aspecto clave a la hora de mejorar la asignación de usuarios a eNBs.

Con estas consideraciones, el *objetivo* de este capítulo consiste en presentar una propuesta novedosa del problema de asignación de usuarios a eNBs en LTE que tiene una doble vertiente. Por un lado, se formula matemáticamente el problema UCAP en LTE como un problema de optimización combinatoria basado en minimizar la mencionada métrica DTS que, como se ha mencionado introduce cierta justicia en el reparto de recursos. Por otro lado, y como consecuencia de la complejidad de la formulación, se propone un algoritmo evolutivo (EA) [129, 130, 138] adaptado a este problema, y cuyos detalles se han publicado en [36].

Con este objetivo, las principales *contribuciones* de esta tesis en este apartado son:

- Se define la métrica DTS, incluyendo las muy variados detalles técnicos de LTE

5.1 Motivación, posicionamiento y contribuciones

que influyen en su cálculo preciso y realista. Se trata de una contribución que hace nuestro enfoque diferente de otros ya existentes, como se muestra en la Sección 3.4 donde, en la mayor parte de los casos la asignación se realiza en base a la maximización de las tasas de usuario. Otras métricas para estudiar el rendimiento de LTE, esencialmente basadas en maximizar el rendimiento general del sistema [42] o en minimizar el retardo [42, 173], se centran básicamente en la operación del sistema, mientras que nuestra métrica DTS se dirige a la fase de dimensionamiento.

- Se formula el problema de asignación de usuarios a celdas como un problema combinatorial NP hard, adecuado para ser resuelto por medio de un metaheurístico como el EA propuesto. Los problemas combinatorios de asignación de usuarios a celdas son computacionalmente intratables [76] en este tipo de redes convencionales de macro-celdas (que implican varios cientos de usuarios) e incluso en las emergentes HetNets [34, 73, 74] y UDNs [75] (en las que la densidad de usuarios y eNB es similar [77]). Sin embargo hay algunos estudios clave recientes que proponen métodos matemáticos capaces de transformar el problema original en otro que se puede resolver con exactitud y con menor coste computacional (aunque aún elevado) [76, 86, 90, 91, 121, 170].
- Se aborda este problema altamente complejo proponiendo una implementación particular de EA que siempre mantiene la mejor solución en la población a evolucionar. Como se muestra en [174, 175], esta clase de EA busca converger al óptimo global cuando el número de generaciones es lo suficientemente grande [174]. Conceptualmente, este número de generaciones puede tender a infinito en algunos problemas. Sin embargo, cuando la solución se mantiene estable después de un número de generaciones suficientemente grande, se considera como término general que el algoritmo ha alcanzado una solución cercana a la óptima. En cualquier caso, a pesar de la controversia acerca de si el resultado es óptimo o no, el hecho cierto es que la solución encontrada es siempre mejor que la obtenida por algoritmos convencionales.

La formulación matemática del problema UCAP en LTE se describe en la Sección 5.2 siguiente.

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

5.2 Formulación matemática del problema

Los principales aspectos relacionados con LTE, y que son de especial interés para el problema que se pretende abordar, han sido detallados en la Sección 2.2.2 de esta tesis, y se recurrirá a ellos para plantear matemáticamente el problema.

Sea \mathcal{A} el área de servicio en la que hay un conjunto de \mathcal{N}_B eNBs, $\mathcal{B} = \{B_1, \dots, B_{\mathcal{N}_B}\}$. Sea $\mathcal{U} = \{u_1, \dots, u_{\mathcal{N}_U}\}$ el conjunto de \mathcal{N}_U usuarios *activos*. El objetivo es, como se ha mencionado, asociar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs de forma que se minimice la métrica DTS. Para definir la métrica DTS es necesario introducir ciertos conceptos previos.

Considérese pues que un usuario cualquiera u_l se asigna (o asocia) a un cierto eNB, etiquetado como B_k . Esta asignación se representa matemáticamente como “ $u_l \in B_k$ ”. Como se ha recordado en la Sección 2.2.2, la unidad de tiempo más pequeña en la el eNB B_k asigna recursos radio a cada usuario u_l es 1 TTI = 1 ms [11]. El número de bits que u_l puede recibir durante 1 TTI se llama TBS, de forma que, durante 1 TTI, el eNB B_k asigna recursos al usuario u_l con una régimen binario o *throughput* (b/s),

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{u_l \in B_k}(\text{bit/s}) &= \frac{\text{TBS}_{u_l \in B_k}(\text{bit})}{\text{TTI}(\text{s})} = \\ &= \frac{\text{TBS}_{u_l \in B_k}(\text{bit})}{10^{-3}\text{s}} = 10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l \in B_k}(\text{bit}), \end{aligned} \quad (5.1)$$

con la restricción

$$\mathcal{T}_{u_l \in B_k} \leq R_{b,\text{Peak}}^{S_i}, \quad (5.2)$$

donde $R_{b,\text{Peak}}^{S_i}$ es la velocidad de pico máxima asociada al servicio S_i .

Así, si el usuario u_l , con *throughput* $\mathcal{T}_{u_l \in B_k}$ (bit/s), demanda descargar un archivo con tamaño $\mathcal{F}_{\text{size}}$ (bit), el tiempo que tardará en descargarlo (“Download Time” –DT–), en segundos, será

$$\text{DT}_{u_l \in B_k} = \frac{\mathcal{F}_{\text{size}}(\text{bit})}{\mathcal{T}_{u_l \in B_k}(\text{bit/s})} = \frac{\mathcal{F}_{\text{size}}}{10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l \in B_k}} \quad (5.3)$$

Con estos conceptos, se define la métrica DTS (*Download Time of the complete System*) como el tiempo máximo requerido por todos los usuarios del sistema para completar sus descargas,

$$\text{DTS} \doteq \max(\text{DT}_{B_k}), \forall B_k, k = 1, 2, \dots, \mathcal{N}_B \quad (5.4)$$

5.2 Formulación matemática del problema

donde DT_{B_k} , tiempo de descarga en el eNB B_k , es el tiempo requerido para que el usuario con *menor* régimen binario asignado al eNB k complete su correspondiente descarga. Es, por tanto, el *tiempo máximo* requerido para que *todos* los usuarios asignados a B_k ($\forall u_l \in B_k$) completen sus descargas,

$$DT_{B_k} \doteq \max(DT_{u_l \in B_k}), \forall u_l \in B_k, \quad (5.5)$$

donde $DT_{u_l \in B_k}$ es el tiempo de descarga necesario para que el usuario $u_l \in B_k$ descargue un fichero de tamaño $\mathcal{F}_{\text{size}}^{u_l, S_i}$ (bit), como se ha establecido en la Expresión (5.3).

Encontrar la asociación usuario-eNB que minimice la métrica DTS se puede escribir con una representación combinatoria equivalente,

$$\min_{\mathbf{M} \in \mathcal{M}} \max_{\substack{\forall u_l \\ \forall B_k}} \underbrace{\frac{\mathcal{F}_{\text{size}}^{u_l, S_i}}{10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l}}}_{r_{u_l}} m_{kl} \quad (5.6)$$

donde $10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l} \equiv r_{u_l} \equiv \mathcal{T}_{u_l \in B_k}$ (bit/s) es la tasa binaria o throughput del usuario u_l –véase la Expresión (5.1)–, \mathcal{M} es el conjunto que contiene todas las matrices binarias \mathbf{M} de orden $\mathcal{N}_B \times \mathcal{N}_U$, cuyos elementos codifican si un usuario u_l se ha asociado o no al eNB B_k ,

$$m_{kl} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } u_l \text{ se asigna a } B_k (\Leftrightarrow u_l \in B_k) \\ 0 & , \text{ en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.7)$$

restringido a la condición

$$\sum_{B_k} m_{kl} = 1, \forall u_l \in \mathcal{U}, \quad (5.8)$$

que establece que cualquier usuario u_l solo se puede asociar a un (1) eNB basándose en la política SUA, también utilizada en [121].

Obsérvese en la Expresión (5.6) que se ha introducido la notación $r_{u_l} \equiv \mathcal{T}_{u_l \in B_k}$ para establecer un nexo de unión entre nuestra propuesta y otras similares (aunque distintas), como las que aparecen en la descripción de la utilización de funciones NUFs en la página 59 de esta memoria.

A su vez TBS_{u_l} en la Expresión (5.6) (o, equivalentemente, el régimen binario, $r_{u_l} \equiv \mathcal{T}_{u_l \in B_k} = 10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l}$) depende de si el usuario se asigna a un eNB u a otro, del número de recursos disponibles y del algoritmo de *scheduling*¹ [42–44]. Entre los distintos “schedulers” de LTE [42], se ha usado *Round Robin*– (RR) [44], que asigna

¹Se utiliza el término en lengua inglesa por ser éste el más empleado habitualmente.

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

recursos a cada UE en igual proporción y en un orden circular (un UE tras otro), sin tener en cuenta ninguna prioridad. Esta distribución uniforme de recursos a los usuarios se ha realizado también en la muy reciente investigación [121]. Específicamente, TBS_{u_l} en la Expresión (5.6) depende de la técnica OFDMA utilizada en el enlace descendente [16, 45]. De la misma forma, el régimen binario depende no solo de número de RBs asignados y la estrategia de “scheduling” sino también de la técnica MCS aplicada a cada subportadora. La técnica MCS a ser utilizada por un UE se establece en LTE como el MCS más alto que este UE es capaz de decodificar con una BLER (*Block Error Rate Probability*) ≤ 0.1 [13]. El MCS a utilizar depende, a su vez, de la calidad del canal en el receptor del usuario. Esto se mide en términos de SINR, que corresponde con un cierto valor de CQI [47]. El hecho de que los valores de CQI están tabulados en LTE [47] ayuda al eNB a determinar directamente el MCS y el TBS para un UE en base al SINR del usuario. A su vez, el SINR de cualquier usuario u_l es una función de la interferencia total recibida, i_{R,u_l} (Figura 5.1), que a su vez depende de la pérdida $L_{l_z}^{\text{PM}}$ (dB) entre las (otras) antenas involucradas (las de u_l y B_z , $z \neq k$, $u_l \in B_k$) y sobre el modelo de propagación (PM) utilizado. $L_{l_z}^{\text{PM}}$ se calcula utilizando el modelo de “una pendiente” para macro-celdas y el de “dos pendientes” para celdas de menor radio [176, 177] (del orden del km):

$$L_{l_z}^{\text{PM}} = A + B \log f(\text{MHz}) - 13.82 \log h_{B_z}(\text{m}) - a \cdot h_{u_l}(\text{m}) + \varsigma \cdot \log d_{l_z}(\text{km}) + L_{\text{CLU}}, \quad (5.9)$$

donde A and B son coeficientes de pérdidas relacionados con la frecuencia [176], f es la frecuencia portadora, h_{B_z} es la altura del eNB B_z , h_{u_l} es la altura del usuario u_l , ς es el parámetro de pendiente, y a y L_{CLU} son factores de corrección que dependen del tipo de “clutter”. El término “clutter” se refiere en este contexto a los diferentes entornos (denso urbano, urbano, sub-urbano, rural) en los que hay condiciones de propagación muy distintas (debidas a densidad de edificios altos, estructura de calles distintas, etc.) y *diferentes densidades de usuarios* (mucho mayor en entornos densos urbanos que en los rurales). Los valores de estos parámetros se posponen a la parte experimental (Capítulo 7).

Teniendo en cuenta todas estas dependencias, el problema de optimización establecido por la Expresión (5.6) con las restricciones mencionadas es un problema con gran complejidad computacional, que involucra una función con un gran número de variables discretas y de extremos locales. A este respecto, resulta interesante realizar una esti-

5.2 Formulación matemática del problema

mación de su complejidad computacional. Si n es el número total de recursos iniciales demandados en un eNB en el TTI inicial (iteración $i = 0$) y k es el número de recursos disponibles en un TTI _{i} determinado, entonces el tamaño del espacio de búsqueda es

$$\mathcal{S}_{\text{size}} = \sum_{i=0}^{n-k} \binom{n-k-i}{k} \quad (5.10)$$

Utilizando el número de Stirling de segunda especie, $S(n, k)$, y el número de Bell, B_n , es posible encontrar [178] el límite:

$$\mathcal{S}_{\text{size}} < \sum_{k=0}^n S(n, k) = B_n < \left(\frac{0.792n}{\ln(n+1)} \right)^n \quad (5.11)$$

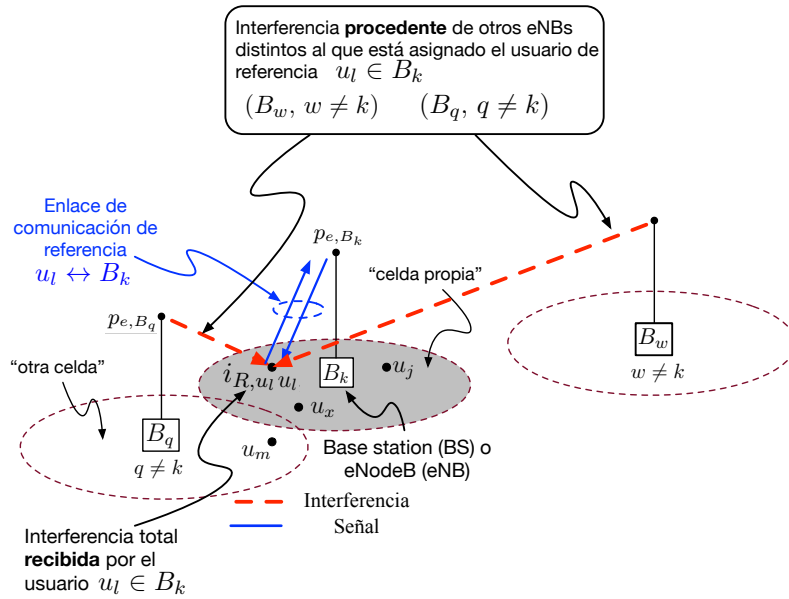


Figura 5.1: Esquema simplificado mostrando el cálculo de la interferencia i_{R,u_l} que recibe el usuario $u_l \in B_k$ desde otros eNBs, B_n , con $h \neq k$.

Para adquirir una idea del orden de magnitud del tamaño del espacio de búsqueda, $\mathcal{S}_{\text{size}}$, se puede suponer, por ejemplo, que se tiene $n = 500$ RBs demandados en el TTI $i = 0$ y que $k = 50$ es el número máximo de RB disponibles que un eNB puede

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

proporcionar por TTI. Esto lleva a

$$S_{\text{size}} < B_{500} \approx 1.61 \times 10^{843} < 1.18 \times 10^{902}, \quad (5.12)$$

lo que demuestra que el problema propuesto no es tratable en tiempo finito.

Esta es la razón por la que se ha propuesto un tipo particular de EA para abordarlo. Con el objetivo de utilizar un algoritmo evolutivo, el problema (5.6) restringido a las condiciones y funciones (5.2)–(5.9) se puede formular de una forma más compacta que facilita su tratamiento mediante el uso de EAs: *encontrar el vector de asignación \mathbf{A}_k de tamaño $1 \times \mathcal{N}_U$ –cuyos elementos son números enteros (a causa de la codificación que se utilizará en nuestro EA), que representan a qué eNB se asigna cada usuario– que minimiza DTS*, es decir,

$$\mathbf{A}_k = \min_{\mathbf{A}} \text{DTS}(\mathbf{A}), \quad (5.13)$$

utilizando las expresiones (5.2)–(5.9). \mathbf{A} representa el conjunto de todos los posibles vectores \mathbf{A}_k . Esta expresión es equivalente a encontrar la matriz binaria \mathbf{M}_k ($\mathcal{N}_B \times \mathcal{N}_U$) que soluciona el problema (5.6).

El algoritmo evolutivo que se ha propuesto se describe en la Sección 5.3 siguiente.

5.3 Algoritmo evolutivo propuesto

Un EA es un algoritmo de optimización que inspirado en los principios de selección natural y genética exhibe propiedades útiles para hacer frente a problemas complejos [129, 130], tales como el formulado en la Expresión (5.13). Entre estos beneficios clave, se destaca la capacidad de optimizar funciones con gran número de variables continuas o discretas y extremadamente complejas, encontrando la solución global para este tipo de problemas [130]. Un EA es capaz de resolver problemas matemáticos extremadamente complejos, que aparecen en ramas muy variadas de la ciencia y de la ingeniería. Su versatilidad hace que puedan emplearse en problemas de búsqueda y optimización en los que otros algoritmos convencionales suelen fracasar (al converger prematuramente a extremos locales) o necesitar demasiado tiempo [129–132]. La reciente publicación [129] ofrece un resumen muy claro de los principios de funcionamiento de los algoritmos evolutivos y de su estado del arte.

Los algoritmos evolutivos se inspiran en un conjunto de conceptos biológicos (Subsección 5.3.1) a partir de los cuales se construyen los conceptos computacionales en los que se basan los EAs (Subsección 5.3.2).

5.3.1 Conceptos biológicos básicos en los que se inspira

Los conceptos subyacentes del EA y la forma en que se implementan computacionalmente están inspirados en cómo la naturaleza encuentra soluciones a problemas complejos tales como “supervivencia del individuo más apto” en un ecosistema en evolución [129]. Con el objetivo de comprender mejor éste y otros conceptos inspirados en la biología y su terminología asociada, es conveniente introducir aquí dos fenómenos biológicos en los que se inspira la Computación Evolutiva:

- Las características externas (“fenotipo”) y las capacidades de los seres vivos se *codifican* (representan) utilizando información genética (“genotipo”);
- La evolución es el resultado de la interacción entre la creación aleatoria de nueva información genética y la selección de aquellos seres vivos que están mejor adaptados al medio.

5.3.1.1 Correspondencia entre genotipo y fenotipo

En la evolución natural, el genotipo es la información genética que codifica y produce el fenotipo (características externas) de un ser vivo (o “individuo”). Específicamente, cada característica se codifica por un “gen”. Un “cromosoma” es el conjunto de estos genes. Cada gen se localiza en una posición particular en el cromosoma y puede exhibir valores diferentes (“alelo”).

5.3.1.2 Evolución natural

La generación aleatoria de nueva información genética en la naturaleza puede dar lugar a una mejor (a veces, o peor) adaptación al medio. Cuanto mejor se adapte un ser vivo a su medio, mayor es su probabilidad de supervivencia, lo que se denomina como “supervivencia del más apto”. A su vez, cuanto más larga es la vida del individuo, mayor es su probabilidad de tener descendencia. En el proceso de la procreación, los predecesores o cromosomas de padres se combinan (“recombinación”) para generar un nuevo cromosoma (que codifica un descendiente). Ocasionalmente, pueden ocurrir “mutaciones” (o variaciones aleatorias en los genes), que son causadas por factores externos (por ejemplo, radiación) o simplemente por errores inevitables cuando se copia la información genética [142]. Esto conduce a una descendencia con algunas nuevas características externas que son diferentes de las de sus predecesores. Si tal característica nueva externa hace que la descendencia se adapte mejor al entorno, su probabilidad de supervivencia y de tener descendencia aumenta. A su vez, parte de la descendencia

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

puede heredar genes mutados (y por lo tanto la correspondiente característica externa), la cual se puede pasar de generación en generación. Estos procesos naturales hacen evolucionar la población, lo que resulta en la aparición de los individuos mejor adaptados y en la extinción de los que peor se adaptan. Para profundizar en detalles sobre las principales similitudes y diferencias entre la evolución natural y los algoritmos evolutivos el lector interesado puede consultar la referencia [129].

5.3.2 Extrapolando conceptos: algoritmo evolutivo

La analogía de nuestro problema con el símil biológico es que estamos buscando la “mejor asignación de usuario” \mathbf{A}_k formulada en (5.13) que minimiza la función DTS indicada por la Expresión (5.4). En esta búsqueda, hay que evaluar un número muy grande de posibles asignaciones con el objetivo de calcular el valor de DTS correspondiente. Cada posible asignación es una solución candidata o “individuo”. El conjunto completo de los individuos se denomina “población”. La medida en que una solución candidata (es decir, una asignación particular de los \mathcal{N}_U usuarios a los \mathcal{N}_B eNBs en el área de servicio \mathcal{A}) es capaz de resolver nuestro problema (es decir, la medida en la cual la asignación correspondiente conduce a un bajo DTS) es la “aptitud del individuo” (“fitness”). Cuanto menor sea el valor de DTS de un individuo, mejor será su “fitness”. Por lo tanto, en la terminología de EA, la “función objetivo” a minimizarse es

$$f_{\text{OBJ}}(\mathbf{A}) = \text{DTS}(\mathbf{A}), \quad (5.14)$$

indicado por la Expresión (5.13).

Al igual que en la evolución natural, cada individuo o solución candidata se codifica mediante un cromosoma, una especie de representación que facilita la solución del problema debido a que transforma el espacio de búsqueda real en otro en el que el trabajo es mucho más fácil. La población se evoluciona a través de la aplicación de operadores genéticos que imitan los procesos naturales de reproducción, mutación y selección.

La aplicación particular del EA propuesto tiene una estructura que consiste en [138]:

1. Codificar las soluciones candidatas (Subsección 5.3.2.1).
2. Generar una población inicial de dominio específico de LTE (Subsección 5.3.2.2).
3. Aplicar operadores genéticos (selección, cruce y mutación) hasta cumplir un criterio de parada determinado (Subsección 5.3.2.3).

5.3.2.1 Propuesta de método de codificación

En nuestro problema de asignar \mathcal{N}_U UEs a \mathcal{N}_B eNBs, el cromosoma \mathbf{c}_γ , que codifica cada individuo (o posible asignación usuarios-eNBs). El cromosoma \mathbf{c}_γ es un vector de longitud \mathcal{N}_U . El subíndice γ se utiliza para etiquetar cada uno de los posibles cromosomas que representan los individuos de la población. Así $\gamma \in \mathbb{Z}$ toma los valores enteros $\gamma = 1, 2, \dots, \mathcal{P}_{\text{size}}$, siendo $\mathcal{P}_{\text{size}}$ es el tamaño de la población o número de individuos en la población.

Cada gen (elemento) en el cromosoma \mathbf{c}_γ codifica el eNB al cual se asigna cualquier usuario $u_i \in \mathcal{U}$,

$$\mathbf{c}_\gamma = [u_1^{B_h}, u_2^{B_q}, \dots, u_m^{B_j}, \dots, u_{\mathcal{N}_U}^{B_w}], \quad (5.15)$$

es decir, el gen de la posición m del cromosoma (5.15), $c_m = u_m^{B_j}$, codifica que el usuario u_m se ha asignado al eNB B_j .

Para entender mejor la codificación, se puede recurrir a la la Figura 5.2 que representa un caso simplificado a efectos ilustrativos. La Figura 5.2 (a) representa un cromosoma para un caso sencillo en el hay $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. Obsérvese que los genes de color azul en las posiciones 1, 3, 5, 7 y 10 contienen el valor “2”, que codifica que los usuarios 1, 3, 5, 7 y 10 se asignan al eNB B_2 , como se muestra en Figura 5.2 (b). Ésta representa la solución en el espacio real, mientras que la Figura 5.2 (a) representa el cromosoma que codifica tal solución en el *dominio transformado* en el que la búsqueda es más fácil.

En lo que sigue, a partir de este punto, los términos “individuo” y “cromosoma” se utilizan indistintamente, ya que cada cromosoma representa de forma única cada solución en el espacio de búsqueda. Esta estrategia puede ser considerada como la transformación del espacio de búsqueda real en otro en el cual el trabajo computacional es mucho más fácil. A partir de un punto de vista matemático, si \mathbb{A} es el conjunto que contiene todos los vectores de asignación candidatos, \mathbf{A}_γ , y \mathbb{C} es el conjunto de cromosomas que codifica cada uno de ellos, \mathbf{c}_γ , esta representación es equivalente a definir una biyección,

$$\Xi : \mathbb{A} \longleftrightarrow \mathbb{C} \quad (5.16)$$

de forma que cualquier vector de asignación se representa por un único cromosoma $\Xi(\mathbf{A}_\gamma) = \mathbf{c}_\gamma$.

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

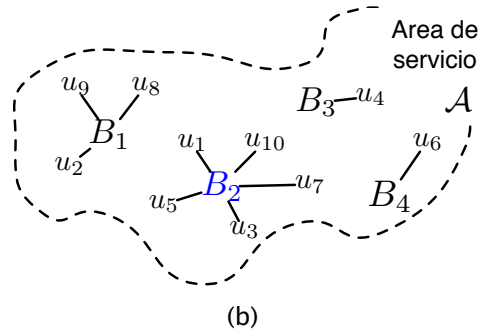
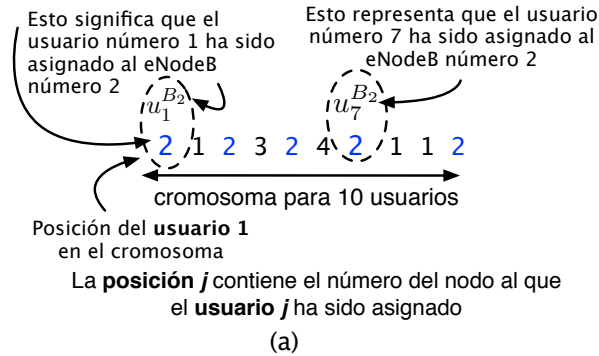


Figura 5.2: (a) Representación simplificada de un cromosoma en una red simple con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (b) Solución candidata (asignación de los $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios a los $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs) codificados por el cromosoma representado en (a).

5.3.2.2 Propuesta de población inicial

Tamaño de población inicial

El tamaño de la población inicial (número de individuos), $\mathcal{P}_{\text{size}}$, es un parámetro clave para el rendimiento de un cualquier algoritmo evolutivo [127, 138, 179, 180]. Por un lado, una gran población podría causar más diversidad de soluciones candidatas (y por lo tanto, un mayor espacio de búsqueda), conduciendo a una convergencia más lenta. Por otro lado, una población demasiado pequeña conduce a una diversidad reducida: sólo una parte limitada del espacio de búsqueda será explorado. Esto aumenta el riesgo

de converger prematuramente a un extremo local. En nuestro problema específico, después de un número de experimentos, el tamaño de población inicial elegido es $\mathcal{P}_{\text{size}} = 100$ individuos, como una solución de compromiso entre complejidad computacional y rendimiento.

Generación de la población inicial

Tan importante como el tamaño de la población inicial es la forma en la que ésta se genera. Normalmente se inicializa de forma aleatoria. Esta estrategia es apropiada para aquellos problemas en los que no hay información previa sobre cómo será la solución. Sin embargo hay problemas en los que una población inicial no aleatoria, en la que algunos individuos están bien adaptados al dominio específico (son buenas soluciones), es más adecuada [181–183]. Este es el caso de nuestro problema ya que se dispone de información acerca de una solución adecuada (aunque no óptima): la proporcionada por el método convencional. En nuestro trabajo preliminar, se ha encontrado que el EA funciona mejor si la población inicial, cuyo tamaño es $\mathcal{P}_{\text{size}} = 100$, se genera de la siguiente forma:

- El 50% de la población inicial es una “semilla” que se genera así:
 - Mediante el método convencional basado en CQI, se calcula una solución sub-óptima del problema: cada usuario es asignado al eNB para el cual tiene mejor SINR (y, en consecuencia, mejor CQI). Hemos llamado a esta solución Asignación de Referencia –*Benchmark Assignment*– (BA). A continuación, se calcula el cromosoma que representa la asignación BA.
 - El 20% de la población inicial se obtiene mediante mutaciones de la solución convencional BA. Estas se obtienen aleatoriamente mutando el 15% de sus genes. El mecanismo de mutación se explicará en la Subsección 5.3.2.3.
 - El 30% restante de $\mathcal{P}_{\text{size}}$ se genera aleatoriamente.
- El restante 50% de la población inicial (de tamaño $\mathcal{P}_{\text{size}} = 100$ individuos) se genera a partir de esta *semilla* (con 50 individuos) por medio de un operador de cruce (ver Subsección 5.3.2.3) con una probabilidad de cruce de 0.2 % hasta que se genere la población inicial de 100 individuos.

Este enfoque para generar un dominio específico de LTE tiene como objetivo reducir el número de búsquedas dentro del espacio de la solución y ayudar a los operadores a encontrar rápidamente el mínimo global.

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

5.3.2.3 Implementación de operadores genéticos

Operador de selección

Los operadores de selección se pueden clasificar básicamente en dos clases [127, 141]: *selección proporcional* (como selección de ruleta y selección universal estocástica) y *selección ordinal* (por ejemplo, selección por torneo) [127, 141, 184]. Después de un número de experimentos hemos seleccionado como operador de selección el de *selección por torneo*. Esta estrategia es una de las más utilizadas como operadores de selección en los EA, ya que proporciona un buen rendimiento en una amplia variedad de problemas, es susceptible de paralelización y puede ser implementado de manera eficiente [127, 185]. La referencia [185] contiene una descripción muy clara de sus conceptos clave.

La selección por torneo tiene como objetivo seleccionar individuos en base a la comparación directa de su “fitness”. En nuestro problema, una solución candidata – asignación de \mathcal{N}_U usuarios a los \mathcal{N}_B eNBs desplegados en el área \mathcal{A} – codificada por el cromosoma \mathbf{c}_g tiene mejor “fitness” que otra, \mathbf{c}_h , si la función objetivo correspondiente $f_{\text{OBJ}} = \text{DTS}$ es mejor (valor DTS mas bajo):

$$\text{DTS}(\mathbf{c}_g) < \text{DTS}(\mathbf{c}_h). \quad (5.17)$$

El operador de selección por torneo más simple consiste en escoger al azar dos individuos (contendientes) de la población y llevar a cabo un combate (torneo) para dilucidar cuál será seleccionado. En particular, cada combate implica la generación de un número real aleatorio $n_{\text{tour}} \in [0, 1] \subset \mathbb{R}$ para ser comparado con una probabilidad de selección preestablecida, p_{selec} . Si $n_{\text{tour}} \leq p_{\text{selec}}$ entonces se selecciona el candidato más fuerte, de lo contrario se seleccionará el candidato más débil. El parámetro de probabilidad p_{selec} ofrece una estrategia adecuada para el ajuste de la presión de selección. Para favorecer a los mejores candidatos p_{selec} se establece, por lo general, como $p_{\text{selec}} > 0.5$ [185].

Esta implementación más simple de torneo con solamente dos competidores (tamaño torneo = 2) se puede generalizar para involucrar a más de dos individuos. Como se muestra en [185], la presión de selección se puede ajustar cambiando el tamaño del torneo. Si el tamaño del torneo aumenta, los individuos débiles tienen una menor probabilidad para ser seleccionados. Es decir, a más competidores, mayor será la presión de selección resultante.

Con respecto a esto, el operador de selección por torneo que hemos implementado tiene un tamaño de torneo de $T_{\text{size}} = \mathcal{P}_{\text{size}} = 100$ contendientes (es decir, todos los individuos están luchando entre sí), y una probabilidad de selección, $p_{\text{selec}} = 0.8$. Como

se ha mencionado, $p_{\text{selec}} > 0.5$ favorece a los mejores candidatos (fitness) [185]. El individuo que acumula más victorias es el que termina siendo seleccionado como él que pasa a la siguiente generación en el proceso de selección.

Esta clase de elitismo o supervivencia de los más aptos asegura que no se pierden las buenas soluciones y que la mejor, sobrevive y continúa en la siguiente población (generación) [186]. Aunque existe cierta controversia al respecto, en [174] se muestra que los algoritmos evolutivos que siempre mantienen la mejor solución en la población, ya sea antes o después de la selección, tienden a converger al óptimo global cuando el número de generaciones es suficiente grande [174]. Conceptualmente, este número de generaciones puede tender a infinito en algunos problemas. Sin embargo, cuando la solución permanece estable después de un número suficientemente grande de generaciones, por lo general, se considera que el algoritmo ha alcanzado un óptimo cerca de la solución. Esta es la razón por la cual hemos seleccionado este enfoque de elitismo. En cualquier caso, como se comprobará experimentalmente, el algoritmo evolutivo implementado ofrece siempre mejores soluciones que las proporcionadas por el método convencional basado en CQI.

Operador de cruce

Se ha usado un operador de cruce estándar de dos puntos, adaptado a nuestro problema, tal como se muestra en la Figura 5.3. Funciona de la siguiente manera:

1. Selección aleatoria (con probabilidad de cruce $p_{\text{cross}} = 0.2$) de dos individuos de la población (padre y madre).
2. Selección aleatoria de dos puntos de cruce en los padres.
3. Intercambio de los genes situados entre los dos puntos de cruce de los cromosomas de los padres (el bloque azul del padre es intercambiado con el bloque rojo de la madre en la Figura 5.3), lo que conduce a dos cromosomas hijos.

Operador de mutación

Los operadores de mutación se diseñan para generar *diversidad* en cada generación, con el objetivo de explorar un mayor espacio de búsqueda mediante la introducción de *cambios locales con muy pequeña probabilidad*. Como se ilustra en la Figura 5.4 (a), el operador de mutación implementado selecciona un gen al azar (el de color azul en la

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

posición 8 con el valor “1”), y lo cambia de modo que este gen puede adoptar al azar cualquiera de los restantes valores enteros entre $1, 2, \dots, \mathcal{N}_B$. En la Figura 5.4 (a), el gen azul en la posición 8 ha cambiado de valor “1” (antes de la mutación) al valor “2” (después de la mutación). Esto significa –Figura 5.4 (b)– que el usuario u_8 , que estaba asignado originalmente al eNB B_1 (ya que el gen 8 en el cromosoma tenía valor “1” antes de la mutación), se asigna a B_2 (porque el gen 8 ha cambiado de “1” a “2”). La probabilidad de mutación utilizada es $p_{\text{mut}} = 0.02$.

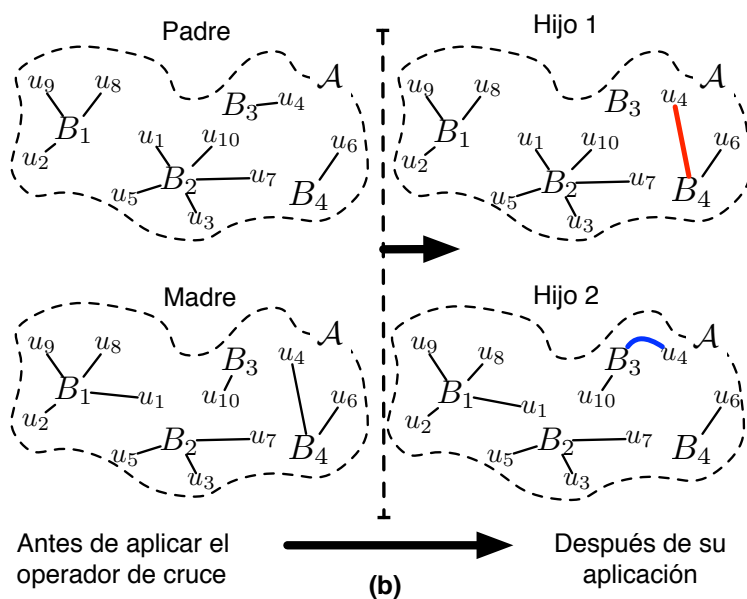
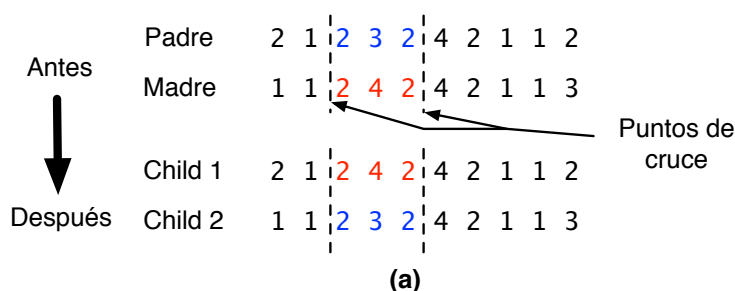


Figura 5.3: Representación simplificada de la forma en la que funciona el operador de cruce implementado. Corresponde a un caso con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (a) Cromosomas padre y madre *antes* y *después* de la aplicación del operador de cruce. (b) Asignación correspondiente (fenotipo) antes y después de la aplicación del operador de cruce.

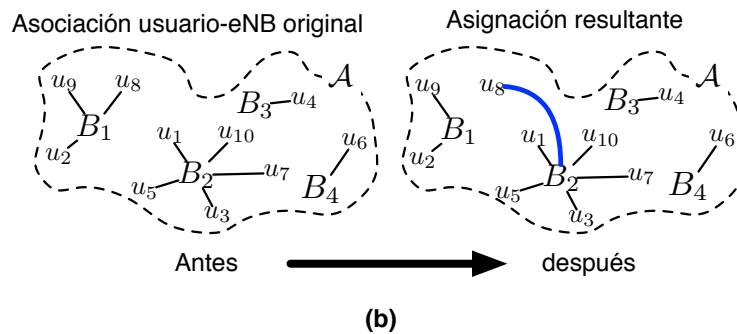
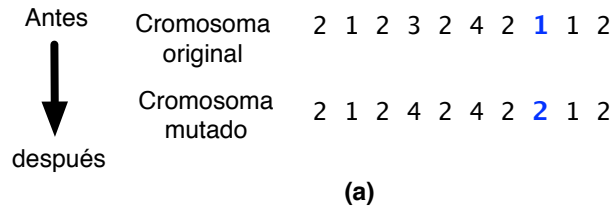


Figura 5.4: Representación simplificada de la forma en la que funciona el operador de mutación en un caso con $\mathcal{N}_U = 10$ usuarios y $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs. (a) La posición 8 se ha seleccionado aleatoriamente, su valor (1) se cambió también aleatoriamente ($1 \rightarrow 2$). (b) Asignación codificada (fenotipo) antes y después de la aplicación del operador.

5.4 Perspectivas prácticas

La propuesta descrita en este capítulo se centra en las fases de dimensionamiento y planificación estratégica desde el punto de vista de los operadores y de las autoridades reguladoras nacionales.

Por un lado, los operadores móviles demandan herramientas capaces de dimensionar la red, y que den cuenta no solo del número de eNBs necesarios para proporcionar una variedad de servicios en un área específica, sino también que tengan en cuenta aspectos relacionados con el rendimiento de las inversiones y la maximización del beneficio durante la fase de operación de la red. El método propuesto trata de convertirse en una herramienta que ayude a lograr un mejor dimensionado de la red. Esto es especialmente importante en la situación actual en la que los ingresos de los operadores están sufriendo una desaceleración debido a que los servicios over-the-top casi no reportan beneficios, y a que sus servicios convencionales están bajo fuerte presión (véase el Capítulo 1). El método propuesto permite hacer simulaciones (como se verá en el Capítulo

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

7) que proporcionan una medida cuantitativa de en qué cuantía mejora el tiempo de descarga global, medido con la métrica DTS, al añadir un nuevo eNB y, con ello tomar una decisión de si la inversión necesaria merece o no la pena.

Por otro lado, el otro grupo de actores que puede estar interesado en este tipo de propuestas son las autoridades reguladoras nacionales, que quieren comprobar si (y en qué medida) los costes y / o las tarifas de interconexión de un determinado servicio de un operador específico son apropiados o, por el contrario, están causando anomalías en el mercado. Con respecto a esto, el objetivo a corto plazo es integrar el algoritmo propuesto en una Herramienta de Planificación Estratégica de Red Móvil –*Strategic Mobile Network Planning Tool*– (SMNTP) cuyos detalles específicos se han publicado en [187–189]. Este tipo de herramientas se aplican comúnmente en proyectos normativos de telecomunicaciones, en los que el objetivo es estimar el coste de la prestación de diferentes servicios bajo el llamado modelo *Bottom-UP Long Run Incremental Cost*– (LRIC) [190, 191], que es el recomendado por la Comisión Europea [192]. El objetivo de LRIC es estimar los costes en los que incurriría un operador hipotético con la misma tasa de mercado del operador en estudio, que trata de poner en práctica una red optimizada en costes con la mejor tecnología adecuada, en este caso LTE. Para hacer esto, se realiza un diseño completo de la red, incluido el número de eNBs optimizado/minimizado para cada área considerada en cada escenario. En esta línea, minimizar DTS determinará el número mínimo de eNBs requeridos para dar cobertura al área de estudio mientras se mantienen restricciones de QoS, lo cual conduce a una mejor experiencia de usuario. La mejora de la experiencia de usuario es de gran relevancia, ya que ayuda a ganar cuota de mercado del operador. Nótese que la realización de un dimensionado adecuado cuando se pretende *actualizar* la red (mediante la implementación de nuevas estaciones base para cumplir con la siempre creciente demanda de tráfico) es crucial. Para ello resulta importante realizar una buena estimación de en *qué cuantía* se reduce el *tiempo de descarga global* al añadir un nuevo nodo. Esto proporciona una herramienta para tomar decisiones suficientemente informadas sobre si la pretendida ampliación de la red será rentable, teniendo en cuenta la necesidad de preservar un margen de beneficio razonable (optimización de la inversión, manteniendo o incluso aumentando la calidad de servicio).

5.5 Resumen del Capítulo

En este capítulo se ha propuesto un nuevo método para asociar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs en redes LTE. La propuesta tiene una doble vertiente, en lo que respecta al planteamiento del problema, por un lado, y al algoritmo evolutivo para resolverlo, por

otro.

En concreto, se ha propuesto un nuevo modelo que asigna usuarios a eNBs minimizando la nueva métrica o función de coste DTS (Download Time of the complete System), definida como el tiempo mínimo requerido por todos los usuarios activos en el sistema para completar sus correspondientes descargas. El problema de la asociación usuario-celda es, en general, un problema combinatorio de tipo NP hard. Aunque se ha visto que hay algunos trabajos parcialmente relacionados, que abordan esta complejidad *transformando el problema* en otro cuya solución *óptima* es menos difícil de obtener (aunque aún con un gran coste computacional, y no aplicable a redes “grandes” comerciales), la novedad de nuestro planteamiento estriba en solucionar el problema combinatorio (*directamente*, sin transformarlo) *de forma aproximada* mediante la minimización de la nueva métrica DTS.

Y es ahí dónde surge la segunda contribución: realizar la asignación cuasi-óptima, aproximada, minimizando la función de coste DTS *mediante un algoritmo evolutivo* (EA) adaptado al problema. Su coste computacional, que en cualquier caso es menor que la exploración combinatoria (intratable computacionalmente en redes comerciales), no es un factor limitante porque es un algoritmo off-line destinado a ser utilizado durante la etapa de dimensionado y en ningún caso durante la fase de operación.

La propuesta de este capítulo para asignar usuarios a eNBs es novedosa en el sentido de que se encuentra entre *dos tipos de enfoques* (conceptualmente muy distintas) al problema. El primer enfoque, el de los operadores móviles, consiste en utilizar métodos convencionales *sub-óptimos* (basados en SINR o bien en balance de carga (LB)). El segundo enfoque es el académico, que suele centrarse en *modelos óptimos* pero empleando hipótesis *poco realistas* o muy difíciles de llevar a la práctica (por ejemplo, redes muy pequeñas), *lo que impide su utilización por parte de los operadores*. Ese gap intermedio –entre soluciones *exactas* pero en *redes poco realistas* (muy pequeñas), por un lado, y métodos convencionales *aproximados* en *redes reales* (en el enfoque de los operadores)– es precisamente el que la investigación presentada en este capítulo pretende ocupar, al proponer un nuevo modelo de asignación cuya resolución aproximada mediante un algoritmo evolutivo EA proporciona mejores resultados que los métodos convencionales en redes reales [36].

En el contexto general de las redes inalámbricas, el problema de la asociación usuario-celda, que es NP hard, tiene una extensa literatura. En relación a ésta, la propuesta de este capítulo se diferencia de [84] en que ésta busca una solución aproximada del problema de asociación de usuarios a Puntos de Acceso en redes WiFi, pero minimizando el ratio de satisfacción del usuario (el recíproco de la carga) utilizando un algo-

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

ritmo *greedy*. Por otro lado, nuestra propuesta se diferencia de [76, 86, 90, 91, 121, 170] en el hecho de que éstos transforman el problema original –de tipo combinatorio, e intratable en redes reales– en otro que se puede resolver de forma exacta con una menor complejidad computacional (aunque todavía muy elevada), mientras que nuestra propuesta resuelve directamente el problema combinatorio mediante un EA que busca una solución sub-óptima. Nuestro método difiere de [91], el más parecido en concepto, en que: 1) La formulación combinatoria es distinta; 2) Nuestra formulación, basada en la minimización de la nueva métrica DTS, incluye los aspectos técnicos de LTE; y 3) en nuestra propuesta resolvemos el problema de forma aproximada mediante un EA en redes reales (con densidades de usuarios de varios centenares de usuarios por km^2), mientras que [91] resuelve un aproximación lineal mediante evaluación combinatoria en redes muy pequeñas.

La propuesta de este capítulo, centrada en la minimización de DTS (en vez de en la maximización de tasas de usuarios individuales, como se hace en muchos de los trabajos), se traduce en la asignación de usuarios desde unos eNBs que, de lo contrario estarían sobrecargados (cuando se utilizan otros enfoques convencionales, tales como el basado en CQI), a otros con menos carga. Esto tiene un *doble beneficio* tanto para el operador como para los usuarios. Por un lado ayuda al operador a utilizar sus recursos de una manera más equilibrada y rentable. Por otro, la estrategia propuesta reduce el tiempo de descarga (aumentando la velocidad) para *la mayoría* de los usuarios. En este sentido, ayuda a una mejora de la calidad de servicio para la mayoría de los usuarios.

Y como sucede con otras propuestas como [76, 86, 90, 91, 121, 170], nuestro planteamiento de asociar usuarios a eNBs es un problema combinatorio muy complejo. Nótese que la función DTS es una función con un número largo de variables discretas y muchos mínimos locales, que no es fácil de minimizar. Su formulación combinatoria, aunque diferente de otras similares, es también NP hard.

Esta es precisamente la razón que ha motivado la segunda contribución de nuestro trabajo, que consiste en abordar el problema de minimización de DTS mediante el uso de una implementación particular de un EA. Aunque hay un buen número de trabajos que aplican algoritmos evolutivos a la asignación de recursos en LTE, hasta dónde se ha podido comprobar, no existe ninguno que se centre en resolver el problema de asociación usuario-eNB en LTE de la forma que nosotros hemos propuesto en [36]. Un aspecto interesante es la forma en la que se realiza la codificación de las soluciones (asignaciones usuario-celda) candidatas. El cromosoma es un vector de dimensión \mathcal{N}_U en el que cada elemento representa un usuario. El elemento en la posición j contiene cierta información sobre el usuario u_j . Esa información es un número entero que representa a qué eNB de

los N_U disponibles se ha asignado dicho usuario. Los operadores de mutación, cruce y selección se han diseñado para que puedan trabajar con esta codificación. El operador de cruce, en particular, es un torneo de todos contra todos. El otro aspecto novedoso de la implementación del algoritmo evolutivo propuesto se encuentra en la población inicial. Como se tiene información de una solución sub-óptima del problema (la proporcionada por el método convencional basado en CQI –que asigna un usuario al eNB para el cual tiene mejor CQI–), se incluye ésta en la población inicial, y el resto de los individuos se genera, básicamente, aplicando los operadores de mutación y cruce sobre esa solución. En cualquier caso, la solución encontrada (asociación de cada usuario a un eNB) es mejor (menor DTS) que la asignación realizada con métodos convencionales (CQI y LB (Load Balancing)).

El método propuesto en este capítulo puede ser de interés para los operadores, que se encuentran inmersos en una dinámica en la que los aumentos de ingresos se están ralentizando. La razón se encuentra en una combinación de factores, que van desde la necesidad de encontrar un modelo de negocio que les permita obtener mayores beneficios de las aplicaciones *over-the-top*, hasta el hecho de que sus servicios convencionales reportan menos ingresos, o la necesidad de financiación para nuevos despliegues. Así, teniendo en cuenta la necesidad de los operadores de mejorar los márgenes de ganancia (optimizando la inversión manteniendo o incluso aumentando la calidad del servicio), el método propuesto podría ser una herramienta útil para *tomar mejores decisiones* sobre el dimensionamiento rentable de la red y la actualización ésta (mediante la implementación de nuevos eNBs para satisfacer la creciente demanda de tráfico).

5. ASIGNACIÓN DE USUARIOS A CELDAS EN LTE: MODELADO Y SOLUCIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

Capítulo 6

Herramienta de simulación para planificación LTE

El despliegue de una red eficiente, optimizada en coste, tanto para implantar una nueva tecnología como para ampliar una red existente, es un factor clave que determina el éxito o fracaso del proyecto. Para este fin se emplean herramientas de planificación estratégica de red, que ayudan a los operadores a la toma de decisiones sobre la estrategia más conveniente a seguir.

Los algoritmos de asignación usuario-celda desarrollados en esta Tesis requieren de herramientas que simulen el entorno específico de red LTE en el que se realiza dicha asignación. Este concepto se ha representado en la Figura 6.1. En ella se representa la integración del simulador dentro de la herramienta global de planificación LTE. El simulador es capaz de utilizar varios algoritmos de asignación, como el propuesto en el Capítulo 5 o los algoritmos convencionales basados en CQI (*Channel Quality Indicator*) o en LB (*Load Balancing*).

Como se ha descrito de forma detallada en el Capítulo 4, la herramienta implementada en esta Tesis está diseñada para su utilización en el proceso de *dimensionamiento* de la red, es decir, *en la primera fase de la planificación celular*, orientándose principalmente al estudio de la *cobertura* y *capacidad* del sistema. Es por ello que se han utilizado modelos de propagación genéricos (como el descrito por la Expresión (5.9)), sin tener en cuenta criterios orográficos específicos, pero suficientemente *flexibles*: contienen parámetros que permiten ajustarlo a *diferentes entornos* a los que se enfrentan los operadores: entorno denso urbano (DU), urbano (U), sub-urbano (SU) y rural (R).

La necesidad de tal herramienta se ha justificado en la revisión del estado del arte efectuada en el Capítulo 3. En particular, en el análisis del estado del arte referido al

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

dimensionamiento (Sección 3.1) y a las herramientas disponibles (Sección 3.2) se observa cómo, si bien desde el punto de vista de estudio de cobertura, los modelos estudiados suelen emplear la misma metodología, para el estudio de la capacidad usan diversas técnicas que requieren de una parametrización amplia y compleja. Esa complejidad demanda una herramienta en la que la parametrización sea más sencilla (en comparación con las descritas en la Sección 3.2), en lo que respecta a la introducción de parámetros de entrada y a la ubicación inicial de los eNB. Las herramientas de simulación comúnmente más empleadas –tanto comerciales como no comerciales– *no presentan la flexibilidad* suficiente para investigar ciertos aspectos, como, por ejemplo, el tiempo de descarga total de los usuarios del sistema y, por lo tanto, el rendimiento medio. La optimización de esta salida, mediante una asignación de usuarios a eNB novedosa, como la propuesta en el Capítulo 5, tampoco se puede hacer con las herramientas disponibles.

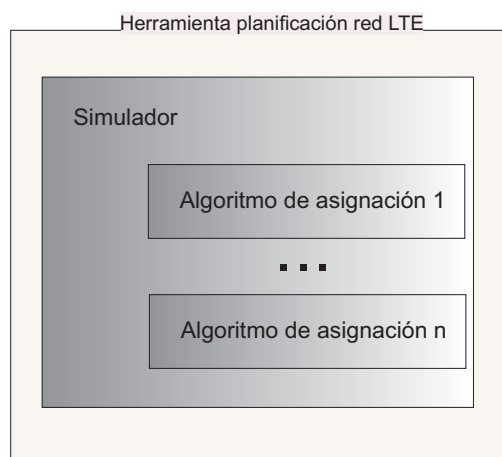


Figura 6.1: Representación conceptual de la integración del simulador dentro de la herramienta de planificación de red LTE.

La conclusión de la revisión del estado del arte realizada en el Capítulo 3 es que se necesita una herramienta: (1) que exhiba una parametrización sencilla y eficaz de los múltiples parámetros de entrada y de la ubicación inicial de los eNB, y que (2) permita simular un entorno multi-servicio y multi-usuario, con (3) diferentes algoritmos de asociación usuario-eNB y (4) diferentes algoritmos de *scheduling*¹, de forma que (5) se garantice el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga Mínima de cada

¹Se emplea este término por ser el más utilizado en el ámbito.

servicio. Para cumplir los requisitos (1) – (5), la herramienta calcula la velocidad media de los servicios ofertados, teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNB, calculados previamente, se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios simulados, entonces se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento, se añaden eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

La herramienta se ha desarrollado en MATLAB, empleando funciones MEX en aquellos módulos o funciones que requieren mayor *complejidad computacional*, y tiene una *estructura modular* con funciones específicas para simular bloques propios del proceso de planificación. Para mayor facilidad de uso se ha implementado bajo entorno gráfico mediante la utilidad GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*).

Con estas consideraciones, este capítulo se organiza de la forma siguiente: La Sección 6.1 describe las características generales, para poder entrar luego en detalles en las secciones siguientes. En concreto, se detalla el diseño e implementación de un simulador orientado a la ejecución de algoritmos de asignación usuario-celda en redes LTE, integrado en una herramienta de planificación estratégica de una red LTE. Este simulador se ha desarrollado con el objeto de verificar los resultados obtenidos mediante los diversos modelos y algoritmos descritos en la Sección 2.2.3, y en el Capítulo 5. La Sección 6.2 muestra ciertos detalles de la herramienta software de planificación de red LTE que se ha implementado. La Sección 6.3 describe un ejercicio de aplicación sencillo donde se busca ilustrar la versatilidad de la herramienta desarrollada (tanto para actividades docentes –como en esta sección– como para labores de investigación –que se mostrarán en el Capítulo 7 siguiente–). Finalmente, el capítulo concluye con la Sección 6.4 donde se resumen las principales conclusiones.

6.1 Características generales

La herramienta desarrollada en esta Tesis está compuesta por distintos bloques funcionales implementados en forma de funciones en MATLAB. La comunicación entre ellos se lleva a cabo mediante parámetros de entrada y salida. Cada bloque funcional realiza una determinada tarea dentro del proceso de dimensionado de red, desde la generación de usuarios hasta la asignación de recursos a usuarios con una determinada estrategia de *scheduling*.

Para realizar una ejecución es necesario previamente la “carga de un escenario”, nuevo o preexistente, como se muestra en la ventana inicial de la herramienta (Figura 6.2). Este escenario posee datos básicos sobre el *entorno* en el que se quiere realizar

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

la simulación (Rural, Urbano, Suburbano o Denso) y sobre las *características* de la red LTE y de los *servicios* demandados.



Figura 6.2: Ventana inicial. Permite cargar un escenario que contiene un conjunto de datos sobre el *entorno* a simular (Rural, Urbano, Suburbano o Denso) y sobre las *características* de la red LTE y de los *servicios* a prestar.

El escenario se puede parametrizar, adaptándose, por tanto, a necesidades concretas de simulación. Como se ha comentado anteriormente, se ha utilizado para el diseño del interfaz de usuario la utilidad GUIDE, que permite, entre otras cosas, la creación de una interfaz de fácil uso, evitar posibles errores en la manipulación de controles, y mantener, en todo momento, una visión gráfica de la ejecución del programa.

Un escenario queda definido por un conjunto de parámetros de entrada al sistema que, conceptualmente se pueden agrupar en tres bloques. Los tres tipos de parámetros de entrada, ilustrados en la Figura 6.3, son: Parámetros generales (“P. Generales”), parámetros de eNB (“P. eNB”) y parámetros de servicio (“P. Servicio”).

Los parámetros de entrada –que describen un escenario (datos sobre el *entorno* a simular –Rural, Urbano, Suburbano o Denso– y sobre las *características* de la red LTE y de los *servicios* a prestar)– quedan especificados de la forma siguiente:

- **Parámetros generales.** Se trata de variables globales del sistema LTE tales como:
 - Altura del usuario (m).
 - BLER (%). De acuerdo a lo descrito en la Sección 2.2.2, el valor máximo a considerar será 10%.
 - BW (MHz). Ancho de banda del sistema LTE es escalable, y sus posibles valores, ya se han descrito en la Tabla 2.2.

- Probabilidad de cobertura en el área (%). La interpretación de la calidad de la cobertura en el área a cubrir depende del nivel de probabilidad de cobertura, “Area Location Probability”. De acuerdo a [12], se consideran los valores: *límite* = 90%, *óptimo* = 95% y *excelente* = 99%.
- Longitud del área a cubrir (m).

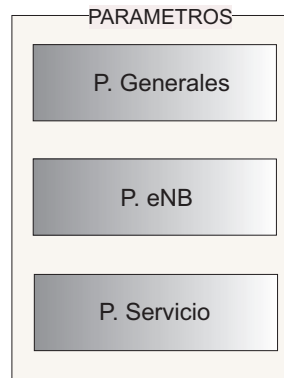


Figura 6.3: Representación de los tres bloques de parámetros de entrada de la herramienta de simulación: parámetros generales (“P. Generales”), parámetros de eNB (“P. eNB”) y parámetros de servicio (“P. Servicio”).

- Tipo de entorno o *clutter*: Denso Urbano (DU), Urbano (U), Suburbano (SU) o Rural (R).
- Frecuencia (MHz). Banda de frecuencia asignada al operador.
- Carga de la celda (%). Representa la cantidad media de recursos utilizados a lo largo del tiempo. A mayor carga mayor interferencia de celdas vecinas.
- Densidad de población (habitantes/km²).
- Market Share¹(%). La cuota de mercado del total del segmento del mercado que está siendo suministrado por el operador analizado.
- Número de eNB en área de servicio \mathcal{A} . Este valor puede ser fijado como parámetro de entrada (en cuyo caso habrá que introducir, además, las coordenadas de los eNBs) o bien puede *ser calculado* directamente por la herramienta. Para seleccionar esta opción basta con introducir el valor 0 para indicar a la herramienta que sea ella la que calcule el número de eNBs.

¹De nuevo, se emplea el término anglosajón por ser el que se utiliza en el sector.

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

- **Parámetros del eNB.** Son un conjunto de datos que dependen de las características del eNB y de su ubicación concreta. Son:
 - Número de antenas de transmisión. El sistema actualmente solo soporta una antena, es decir, no está adaptado a MIMO.
 - Ganancia de transmisión (dBi).
 - Pérdidas del cable de transmisión (dB).
 - Pérdidas de recepción (dB).
 - Pérdidas del cable de recepción (dB).
 - Altura de eNB (m).
 - Potencia de eNB (W).
 - Inclinação de antena ($^{\circ}$).
 - Coordinadas (x, y) (m). Solo tendrá aplicación en caso de haber fijado manualmente un número de eNB distinto a 0 en los parámetros generales.
 - Número de sectores.
- **Parámetros de servicio.** Representan variables asociadas a los servicios ofrecidos a los usuarios:
 - Tasa de penetración de mercado (%). Para un servicio dado, describe el grado en que es conocido por los clientes potenciales y cuántos consumidores realmente compran el producto o servicio.
 - Factor de sobrecarga (“Overload Factor”) (%). Porcentaje de usuarios activos simultáneos.
 - Régimen binario del servicio (Mbps).
 - Tamaño de descarga asociada al servicio (MB).

A efectos ilustrativos, la Figura 6.4 contiene una captura de la ventana donde se introducen los parámetros generales. Las ventanas para la introducción del resto de parámetros tienen una estructura similar.

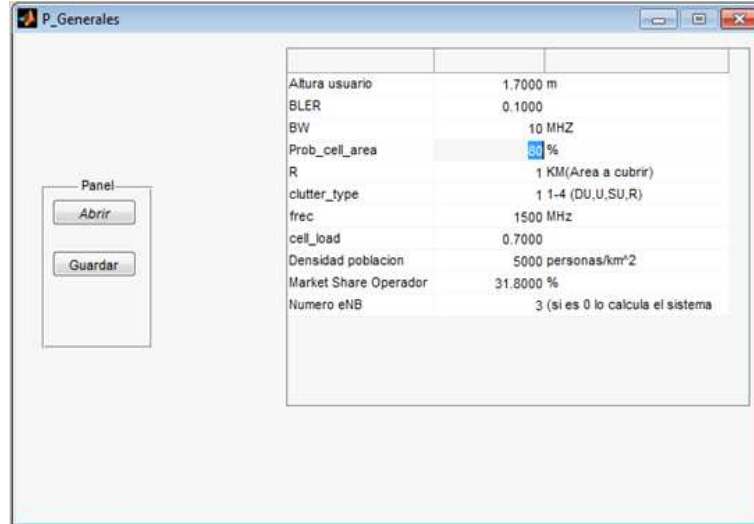


Figura 6.4: Captura de la ventana donde se introducen los parámetros generales.

6.2 Herramienta software de planificación de red LTE

Una vez que se han introducido las características generales y todos los parámetros de entrada, se puede comenzar la ejecución de la simulación del escenario concreto. Los pasos seguidos se representan en el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 6.5, cuyos bloques funcionales se detallan a continuación.

- (a) **Generación de usuarios.** Este bloque genera usuarios *activos* en el área de estudio. Se emplea una distribución de tipo uniforme y tiene en cuenta las dimensiones y la densidad de usuarios del área de estudio propuesto (tipos de entorno DU, U, SU o R). Se toman en consideración parámetros de servicio tales como “market share” del operador en estudio, tasa de penetración de mercado y factor de sobrecarga en un entorno multiservicio. Cada usuario tendrá un servicio asociado, con sus valores característicos, como régimen binario o tamaño de descarga.

Cada área tiene una densidad de población determinada, $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ (habitantes/km²), que es característica del tipo de clutter (superíndice CLU) o entorno. Sin embargo, la densidad de usuarios *activos* es solo una fracción de la densidad de población total. La densidad de usuarios activos depende no solo del tipo de entorno sino también de otros parámetros tales como, por ejemplo, la cuota de mercado (“market share”) del operador ($\mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}}$), la tasa de penetración de mercado del servicio

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

($\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$) o el factor de sobrecarga \mathcal{O}_F . Con estas consideraciones, la densidad de usuarios simultáneos activos con el servicio S_i en un área determinada \mathcal{A} se puede modelar como

$$\rho_{\mathcal{A},U}^{S_i} = \rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}} \cdot \mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} \cdot \mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i} \cdot \mathcal{O}_F, \quad (6.1)$$

siendo

$$\gamma^{S_i} \doteq \frac{\rho_{\mathcal{A},U}^{S_i}}{\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}} = \mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} \cdot \mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i} \cdot \mathcal{O}_F \quad (6.2)$$

la *fracción* de usuarios con el servicio S_i .

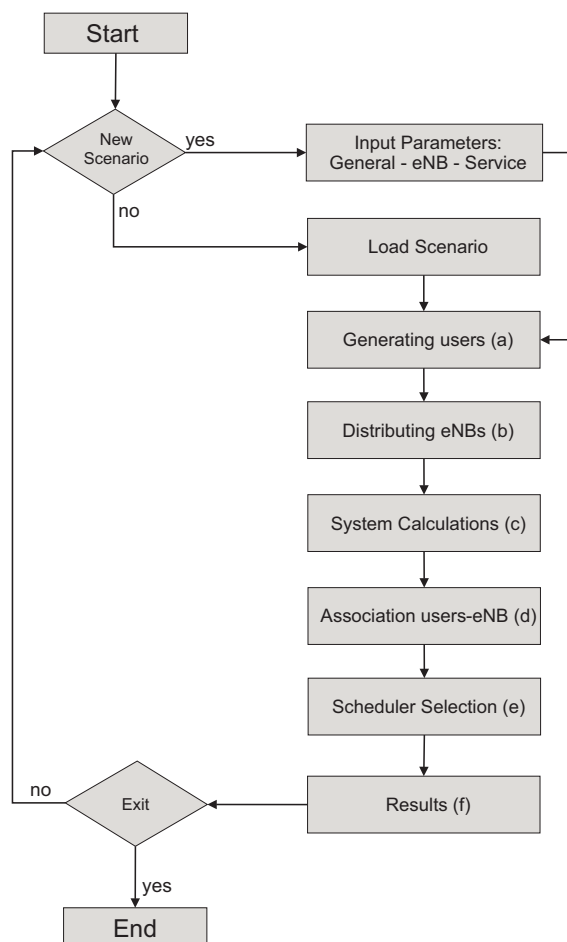


Figura 6.5: Diagrama de flujo general de la herramienta.

(b) **Distribución de eNBs.** Se contemplan dos posibilidades:

- *Distribución fija de eNBs.* En este caso, hay un número preestablecido de eNBs con una distribución fija (coordenadas (x, y)) dentro del área de estudio.
- *Distribución variable de eNBs.* Se calcula el número de eNBs y su distribución sobre el área de estudio. Para ello, previamente se necesita obtener el cálculo del enlace radio (“link budget”) del sistema. El objetivo de la obtención del “link budget” es identificar la pérdida máxima de propagación entre el transmisor y el receptor (tanto para el enlace ascendente como el descendente), considerando todas las ganancias y pérdidas que afectan a la cobertura de la celda. El radio de la celda se obtiene, para los diferentes tipos de entornos, basándose en el modelo de propagación adecuado al medio [11] y, con este radio, se estima el número de eNBs. La Figura 6.6 resume las entradas y salidas para el cálculo del enlace radio.

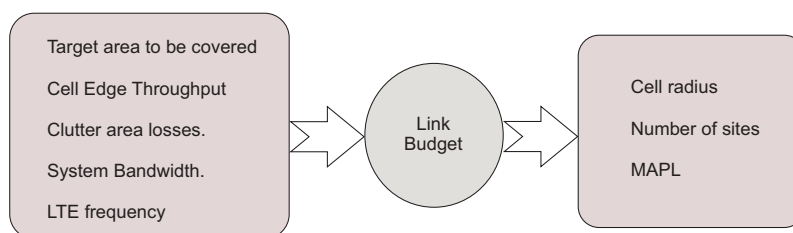


Figura 6.6: Entradas y salidas en el cálculo de enlace radio [11].

(c) **Cálculos del sistema.** Una vez que los usuarios y los eNBs se han distribuido en el área, el siguiente paso consiste en los siguientes cálculos:

- Distancia de cada usuario a cada eNB.
- Pérdida de propagación para cada usuario desde cada eNB. Se calcula L_{lz} mediante el modelo de propagación “one-slope” (para macroceldas LTE) o el modelo “Two-slope” [176, 177] para celdas pequeñas:

$$L_{lz}^{PM} = A + B \log f(\text{MHz}) - 13.82 \log h_{B_z}(\text{m}) - a \cdot h_{u_i}(\text{m}) + \varsigma \cdot \log d_{lz}(\text{km}) + L_{CLU}, \quad (6.3)$$

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

donde A y B son coeficientes para el cálculo de pérdidas de propagación relacionados con la frecuencia [176], f es la frecuencia portadora, h_{B_z} es la altura del eNB B_z , h_{u_l} es la altura del usuario u_l , ς es el parámetro “slope”, y a y L_{CLU} son factores de corrección dependientes del tipo de entorno.

- SINR. La SINR de cada usuario u_l depende de la interferencia total recibida i_{R,u_l} , que a su vez depende de la pérdida de propagación L_{l_z} (dB) entre la antena transmisora y la antena receptora previamente calculada. Este concepto se ha ilustrado ya en la Figura 5.1 de la página 91.
- CQI. Es un valor obtenido de la SINR de cada usuario [47]. Los valores de CQI están tabulados en LTE [47], lo que ayuda a que el eNB directamente determine la técnica de modulación y codificación empleada, MCS, y el tamaño del bloque de transporte, TBS, para cada usuario u_l , tomando como entrada el SINR de dicho UE. Mediante MCS, TBS y la estrategia de scheduling, se puede calcular el *bit-rate* instantáneo, r_{u_l} (bit/s) = $10^3 \cdot \text{TBS}_{u_l}$.

(d) **Asignación usuarios-eNB.** Se proponen en la herramienta tres métodos:

- Asignación convencional basada en CQI. Es equivalente a asociación basada en SINR. Este método asigna cada usuario al eNB para el que el usuario tiene el mejor CQI (mejor SINR). Se trata del método de asignación más simple y más usado en la industria [83, 87]. Sin embargo, como se explica en Kim *et al.* en [90], puede ser *inapropiado* al *no* tener en cuenta la carga instantánea de cada eNB.
- Asociación usuario-eNB basada en CQI y balanceo de carga –*Channel Quality Indicator - Load Balancing association method*– (CQI-LB). Este segundo método, que hemos propuesto en [36], se basa en una combinación de CQI y técnica de balanceo de carga en la que los usuarios se asocian a eNBs de la siguiente manera. Sea \mathcal{L}_B^{max} la carga máxima que cualquier eNB puede soportar y $\gamma \cdot \mathcal{L}_B^{max}$ un límite inferior para el que se considera que un eNB está “poco” cargado. Por conveniencia, se ha seleccionado $\gamma = 0.5$, es decir, el eNB está a la mitad de su máxima carga \mathcal{L}_B^{max} . Se define también un umbral de carga dinámico $\mathcal{L}_B^{Th} = E[\mathcal{L}_{B_k}] + \text{Var}[\mathcal{L}_{B_k}]$, donde $E[\mathcal{L}_{B_k}]$ y $\text{Var}[\mathcal{L}_{B_k}]$ son, respectivamente, el valor medio y varianza de la carga calculada sobre todos los eNB. Al comenzar el algoritmo, los usuarios se asignan primero a eNBs basándose en CQI, de forma que se calcula un primer conjunto de valores de las cargas correspondientes, $\mathcal{L}_{B_k} \forall B_k$, y del umbral de carga inicial \mathcal{L}_B^{Th} . Si

6.3 Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación

$\forall u_l$ y $\forall B_k$ la carga resultante es $\mathcal{L}_{B_k} \leq \gamma \cdot \mathcal{L}_B^{max}$, tal asociación usuario-celda no afecta significativamente a la capacidad (celdas poco cargadas, $\gamma = 0.5$), y el algoritmo converge a la asociación basada en CQI. Sin embargo, si se da el caso en el que algún usuario u_w resulta asignado a un eNB B_z de tal forma que se excede el umbral, $\mathcal{L}_{B_z} > \mathcal{L}_B^{Th}$, entonces u_w se asigna al siguiente eNB para el que u_w tenga mejor CQI, y, como consecuencia, \mathcal{L}_{B_z} y el umbral de carga \mathcal{L}_B^{Th} tiene que ser recalculado.

- Asociación usuarios-eNBs basado en el modelo y el algoritmo evolutivo (EA) que hemos propuesto en [36] y descrito en el Capítulo 5.
- (e) **Selección de “scheduler”.** Como se ha adelantado en el apartado 2.2.3, el scheduler controla la asignación de recursos compartidos entre usuarios en cada instante de tiempo. Dinámicamente asigna recursos a los usuarios de manera que se pueda realizar una transmisión/recepción de datos de forma ordenada via el interfaz radio y manteniendo las necesidades de QoS de los usuarios. Entre las decisiones tomadas están qué usuarios transmitirán/recibirán sobre que recursos y qué MCS se empleará en base al feedback (el CQI) proporcionado por el UE. Las diferentes estrategias de scheduling se han descrito en la Sección 2.2.3.
- (f) **Resultados.** Este bloque muestra los resultados gráficos despues de los cálculos descritos previamente. Se presentan en forma gráfica y de texto los siguientes resultados.
- Asociación usuario-eNB (Figura 6.8).
 - Throughput de cada eNB por TTI (Figura 6.9).
 - Tiempo de descarga de cada usuario ordenado por CQI y por servicio prestado (Figura 6.12).
 - Régimen binario medio por servicio (Figura 6.14).

6.3 Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación

Esta sección describe un ejercicio práctico empleando la herramienta descrita. Por simplicidad no se realizará una descripción completa del funcionamiento de la herramienta, sino que se centrará solo en las entradas más importantes y principales resultados.

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

6.3.1 Planteamiento

El objetivo de este ejercicio es analizar la respuesta de los algoritmos de scheduling tipo Proportional Fair y Round Robin en los entornos Urbano Denso y Urbano. El estudio se ha parametrizado por: 1) el número de eNBs (1, 3, 5, 7 y 10) para cubrir el mismo área geográfica; y 2) el tamaño de descarga por usuario (1, 5 y 10 MB por usuario). Finalmente cada prueba se realizará cinco veces para cada uno de los dos schedulers con el objetivo de obtener valores medios. En la Figura 6.7 se representa un diagrama con el ejercicio propuesto:

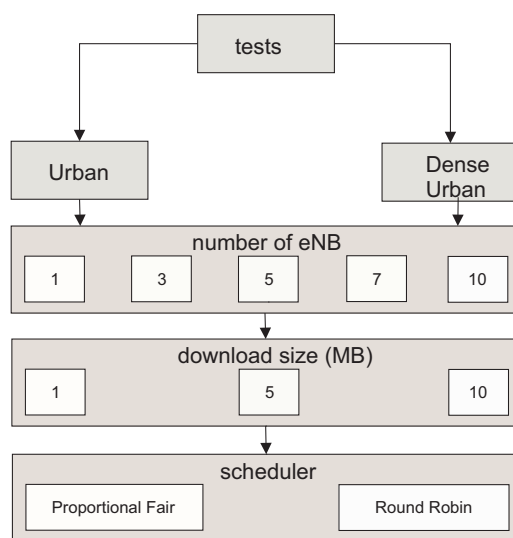


Figura 6.7: Propuesta de ejercicio práctico.

Los parámetros generales adoptados en este ejemplo son los mismos para los dos tipos de entorno considerados:

- Altura de usuario: 1.7 m.
- BLER: 10%.
- Ancho de banda del sistema: 10 MHz.
- Frecuencia portadora: 1800 MHz.
- Carga de la celda: 60%.

6.3 Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación

- Tasa de mercado del operador: 31.8%.

Como se mencionó anteriormente, cada entorno tiene una densidad de usuarios activos característica, que aparece resumida en la Tabla 6.1. Es conveniente considerar un área “representativa” para cada entorno, \mathcal{A}_{CLU} (km²). Estas áreas también se han incluido en la Tabla 6.1 junto con otros valores como densidad de población ($\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$) o densidad de usuarios activos ($\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$).

Los usuarios tienen diferentes características dependiendo de su ubicación, lo que determina el CQI de cada uno. Para explorar diferentes perfiles de usuario realistas, se han considerado cuatro servicios diferentes ofertados, etiquetados como $S_i = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, cuyas características se enumeran en la Tabla 6.2. El régimen binario de usuario está limitado por la tasa pico de descarga correspondiente a cada servicio $R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ (TTI = 1 ms), cuyos valores también se resumen en la Tabla 6.2. Por simplicidad y para facilitar los resultados que siguen, se ha asumido: “market share” del operador $\mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} = 31.8\%$ (el correspondiente al principal operador en España [193]) y factor de sobrecarga $\mathcal{O}_F = 10\%$.

Tabla 6.1: Datos utilizados para los diferentes tipos de entornos explorados: Urbano Denso (DU) y Urbano (U). $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ fija la densidad de población (habitantes/km²) mientras $\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ etiqueta la correspondiente densidad de usuarios activos. \mathcal{A}_{CLU} es el área de cada entorno.

Tipo de área	$\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ (habitantes/km ²)	\mathcal{A}_{CLU} (km ²)	$\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ (UE/km ²)
DU	7000	1	697
U	4500	6	83

Tabla 6.2: Resumen de parámetros característicos de los servicios estudiados en el ejercicio práctico propuesto. $R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ fija el régimen binario pico del servicio S_i , mientras que $\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ y γ^{S_i} representan, respectivamente, “market penetration” y la porción de usuarios activos (respecto a la población total) con el servicio S_i .

Servicio S_i	$R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ (Mbps)	$\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ (%)	γ^{S_i} (%)
S_1	10	107	34.07
S_2	1	70	22.29
S_3	0.1	67	21.35
S_4	20	70	22.29

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

Una vez definidas las pruebas y los parámetros que caracterizan cada paso, en el próximo subapartado se analizan los experimentos y sus resultados.

6.3.2 Resultados

Para ilustrar la funcionalidad de la herramienta desarrollada, y con el objetivo de no distraer la atención en detalles accesorios, en este apartado se compilan sólo los resultados correspondientes a uno de los casos simulados: un entorno Urbano Denso (datos de la Tabla 6.1), con 5 eNBs y un tamaño de descarga de servicio de 5 MB.

El diagrama de flujo representado en la Figura 6.5, y en concretos los bloques (a) y (b), representa cómo se realiza la generación de usuarios y la distribución de eNBs. La Figura 6.8 muestra la salida de la herramienta cuando se utiliza el método convencional de asignación usuarios-eNB basado en CQI. En esta figura, los eNB se representan mediante el símbolo *, mientras que cada usuario se representan mediante el símbolo +. Cada usuario se representa con el color del eNB al que ha sido asignado.

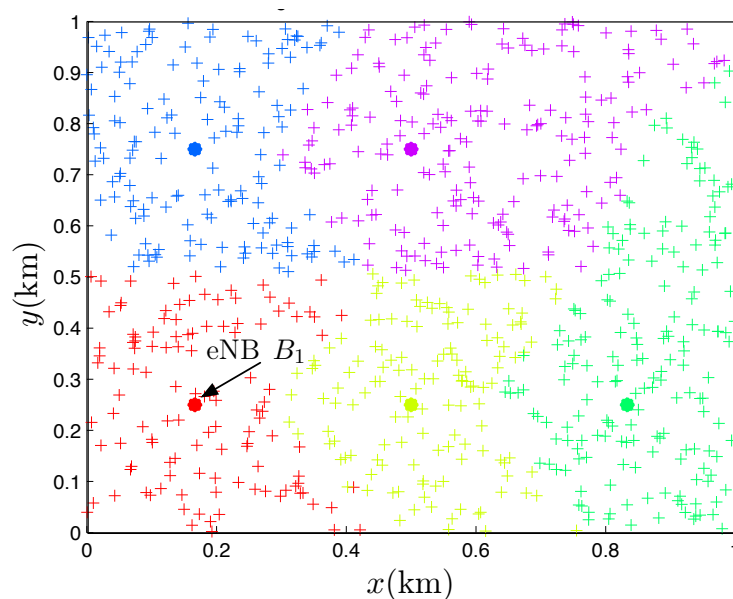


Figura 6.8: Asignación usuario-eNB obtenida mediante el método convencional basado en CQI, que asigna cada usuario al eNB para el cual tiene mayor CQI (equivalentemente, mejor SINR). Los eNB se representan mediante el símbolo *, mientras que cada usuario se representan mediante el símbolo +. Cada usuario se representa con el color del eNB al que ha sido asignado.

Una vez representada la asignación de usuarios, la Figura 6.9 y la Figura 6.10 mues-

6.3 Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación

tran el régimen binario en función del tiempo (ms = TTI), en el eNB B_1 , para los schedulers Round Robin y Proportional Fair, respectivamente.

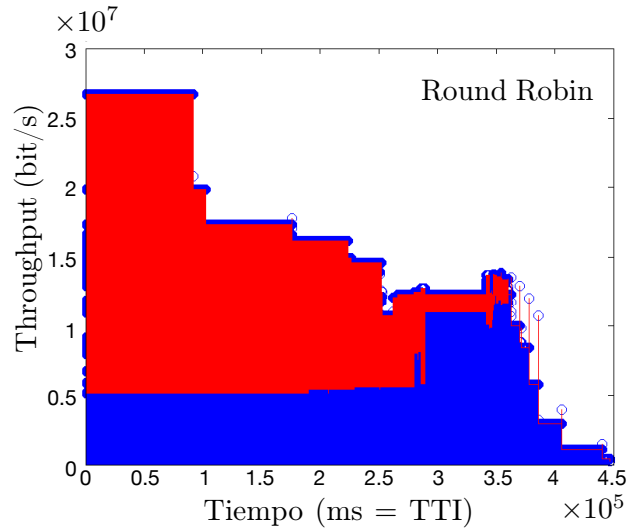


Figura 6.9: Throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 utilizando el scheduler Round Robin. El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.

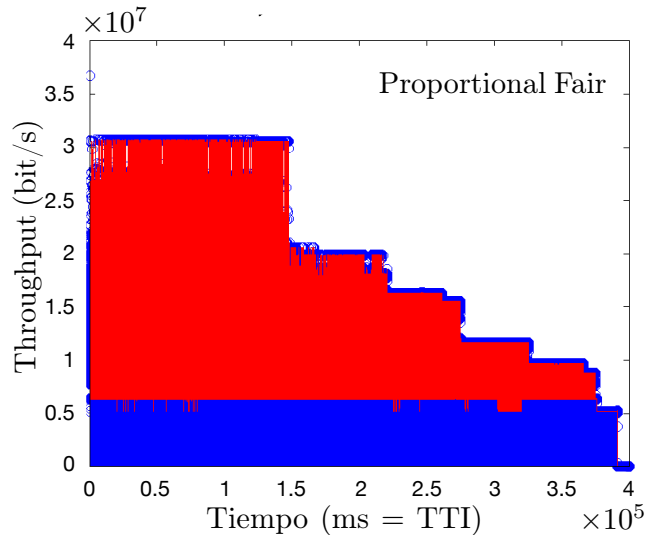


Figura 6.10: Throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 utilizando el scheduler Proportional Fair. El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

En ambas figuras, el color azul representa el valor discreto *instantáneo* de throughput *en cada* TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente. Esto se aprecia mucho más claramente en la Figura 6.11, donde se muestra una visión ampliada del throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI).

Cuando se compara los resultados representados en las figuras 6.9 y 6.10, se puede observar que –para la asignación usuarios-eNBs realizada mediante el método convencional basado en CQI– el eNB B_1 , cuando utiliza el scheduler Round Robin (Figura 6.9) necesita más tiempo para servir los datos demandados por los usuarios ($4,5 \times 10^2$ s) que cuando emplea el scheduler Proportional Fair (4×10^2 s, en la Figura 6.10).

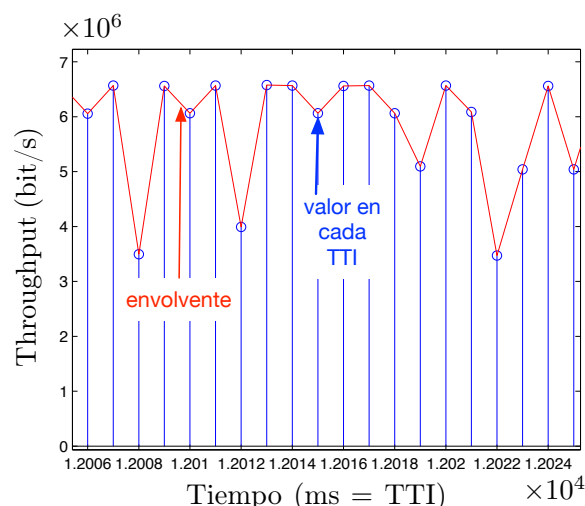


Figura 6.11: Visión ampliada del throughput (bit/s) en función del tiempo (ms = TTI) en el eNB B_1 . El color azul representa el valor discreto de throughput en cada TTI, mientras que el color rojo representa la envolvente.

Otro resultado que ilustra la versatilidad de la herramienta –tanto para actividades *docentes* (como en el ejercicio sencillo que se muestra en la presente sección) como de *investigación* (resultados del siguiente Capítulo 7)– es el tiempo que necesita cada usuario para descargar sus datos. A este respecto, las figura 6.12 y 6.13 representan, respectivamente, el tiempo de descarga (s) que necesita cada uno de los usuarios asignados al eNB B_1 cuando éste utiliza Proportional Fair (Figura 6.12) y Round Robin (Figura 6.13). Los usuarios tienen diferentes servicios $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ (Tabla 6.2) con tasas binarias de pico ($R_{b,peak}^{S_i}$) de valores 10, 1, 0,1 y 20 Mbps, respectivamente. Los usuarios en el eje x están ordenados en orden decreciente de CQI. Por ejemplo el usuario etiquetado

6.3 Ejemplo ilustrativo de una realización de simulación

como “50” tiene un CQI menor que el usuario etiquetado como “100”.

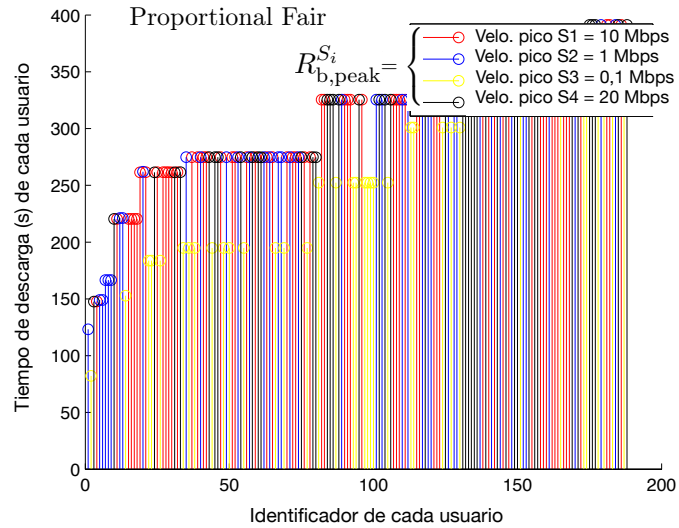


Figura 6.12: Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario asignado al eNB B_1 cuando éste utiliza Proportional Fair. Los usuarios están ordenados y etiquetados en orden decreciente de CQI. Los usuarios tienen diferentes servicios $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ (Tabla 6.2) con velocidad de pico ($R_{b,peak}^{S_i}$) de valores 10, 1, 0.1 y 20 Mbps, respectivamente.

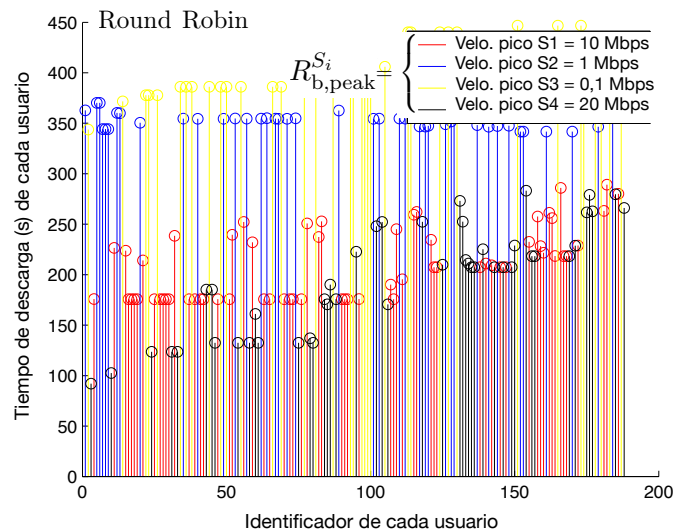


Figura 6.13: Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario asignado al eNB B_1 cuando éste utiliza Round Robin. Los usuarios están ordenados y etiquetados en orden decreciente de CQI. Los usuarios tienen diferentes servicios $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ (Tabla 6.2) con velocidad de pico ($R_{b,peak}^{S_i}$) de valores 10, 1, 0.1 y 20 Mbps, respectivamente.

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

Cuando se compara la Figura 6.12 con la Figura 6.13 se observa cómo, en el caso de utilizar Proportional Fair (Figura 6.12), los usuarios con CQI más alto tardan, lógicamente, menos tiempo en descargar sus datos que los que tienen CQI más bajo. La razón se encuentra en el hecho de que los usuarios se han asignado a el eNB para el cual exhiben el mejor CQI. En el caso de Round Robin (la Figura 6.13), esta característica resulta ser aleatoria.

Además en la Figura 6.14 se visualiza de forma más clara aún el tiempo de descarga de los usuarios (s) en base al servicio demandado, donde, una vez más, los usuarios se ordenan en base a CQI (valor más alto a la izquierda). Permite obtener el régimen binario medio por servicio.

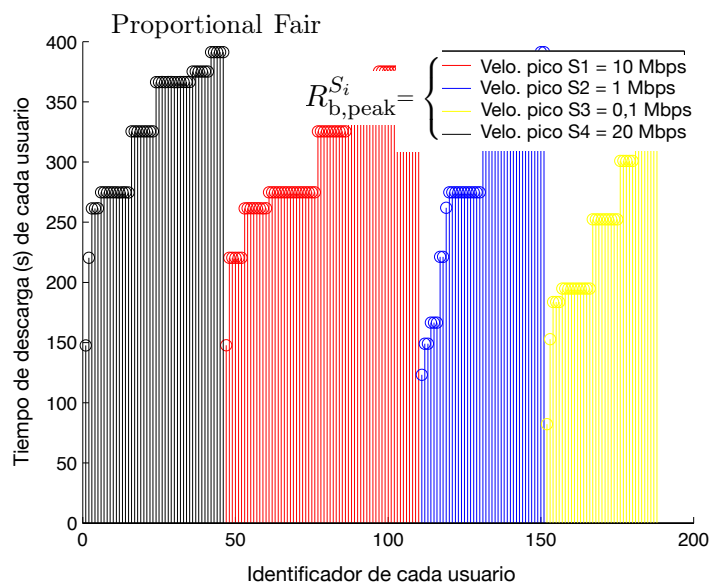


Figura 6.14: Tiempo de descarga (s) que necesita cada usuario del eNB B_1 usando Proportional Fair y ordenados por CQI y velocidad de pico del servicio demandado (en sentido decreciente).

6.4 Conclusiones

En este capítulo se han resumido los aspectos fundamentales de la herramienta de simulación para planificación LTE que se ha implementado. La herramienta está diseñada para su utilización en el proceso de *dimensionamiento* de la red, es decir, en la *primera fase* de la planificación celular, orientándose principalmente al estudio de la

cobertura y capacidad del sistema.

De forma resumida, esta herramienta tiene (1) una parametrización sencilla y eficaz de los múltiples parámetros de entrada y de la ubicación inicial de los eNB, que (2) permite simular un entorno multi-servicio y multi-usuario, empleando (3) diferentes algoritmos de asociación usuario-eNB y (4) varios algoritmos de scheduling, de forma que (5) se garantiza el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga Mínima de cada servicio. Para cumplir los requisitos (1)–(5), la herramienta calcula la velocidad media de los servicios ofertados, teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNB, calculados previamente, se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios simulados, entonces se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento, se añaden eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

Un aspecto en el que se ha hecho especial énfasis a la hora de diseñar la herramienta ha sido en la introducción de parámetros de entrada. Esto permite cargar fácilmente un “escenario”, que no es más que el conjunto de todos los datos sobre: (1) el *entorno* o clutter en el que se quiere realizar la simulación (Rural, Urbano, Suburbano o Denso); (2) las *características* de la red LTE; y (3) las propiedades de los *servicios* demandados. Con todos los datos de entrada, la herramienta permite:

1. Generar la posición aleatoria de los usuarios multi-servicio.
2. Obtener la distribución de los eNBs (que puede introducirse directamente como dato de entrada, o bien determinarse gracias a la herramienta, mediante el cálculo del enlace radio).
3. Calcular las matrices de SINR y de CQI de los usuarios.
4. Resolver el problema de la asociación usuario-eNB mediante tres métodos (el convencional basado en CQI, el método CQI-LB, y el propuesto en el Capítulo 5).
5. Utilizar diferentes schedulers.
6. Mostrar los resultados:
 - Asociación usuario-eNB.
 - Throughput (bit/s) en función del tiempo ($\text{ms} = \text{TTI}$) en cada eNB.
 - Tiempo de descarga de cada usuario ordenado por CQI y por servicio prestado.
 - Régimen binario medio por servicio.

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

Para ilustrar su versatilidad, se ha realizado un ejercicio con el objetivo de evaluar la respuesta de los algoritmos de scheduling Proportional Fair y Round Robin en entornos Urbano Denso y Urbano.

Entre las conclusiones más interesantes extraídas de este ejercicio práctico destacan:

- Se obtiene un caudal medio agregado mayor con Proportional Fair.
- El régimen binario por TTI varía dependiendo del usuario programado en ese TTI. Si son usuarios con un servicio con mayor velocidad pico, y también un CQI alto, el throughput aumenta considerablemente. Si, por el contrario, los usuarios tienen bajo CQI y los servicios limitan la velocidad, el throughput disminuye.
- El tiempo de descarga global del sistema (DTS), es menor con Proportional Fair que con Round Robin.
- Como Round Robin distribuye la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, los usuarios con mejores condiciones acaban antes de descargar, mientras que los peores terminan ralentizando el sistema.
- El tiempo en el que el primer usuario completa su descarga es mayor en Proportional Fair debido a que este algoritmo promueve la eficiencia del grupo. Los usuarios con mejores condiciones se limitan para favorecer a aquellos que las tienen peores.
- Proportional Fair ofrece una menor desviación entre su tiempo de descarga máximo, mínimo y medio.
- Se observa cómo la variación del tamaño de descarga no produce cambios significativos en la velocidad de descarga media de los usuarios. Esto se debe a que el patrón de descarga es similar.
- Conforme se introducen más eNBs en el área, DTS se reduce. Se trata del resultado esperado ya que, conforme hay más eNBs, hay más recursos para distribuir entre los usuarios.

Este caso práctico, que no pretende ser exhaustivo sino ilustrativo, permite mostrar de forma sencilla el potencial de la herramienta desarrollada en el ámbito de esta tesis, y validar su utilización para la implementación, como un módulo de la misma, del algoritmo evolutivo desarrollado en el Capítulo 5. Los resultados gráficos obtenidos, mediante la ejecución del escenario a simular, permitirán la realización de un análisis

comparativo entre las técnicas de asignación de usuarios a eNB basadas en CQI y CQI-LB, y el método y algoritmo evolutivo descrito en el Capítulo 5.

Siguiendo una estrategia similar a la aquí descrita, se ha desarrollado el trabajo experimental mostrado en el Capítulo 7 siguiente, ya centrado, exclusivamente, en la investigación cuyos resultados hemos publicado en [36].

6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PLANIFICACIÓN LTE

Capítulo 7

Experimentos y resultados

El presente capítulo es un resumen del trabajo experimental que hemos publicado en [36]. En ese artículo hemos presentado, de forma *unificada*, nuestras contribuciones al problema de la asociación de usuarios a eNBs en LTE: 1) *planteamiento* original, 2) *solución* novedosa mediante un algoritmo evolutivo (EA), y 3) su *demostración* mediante un variado conjunto de *simulaciones*. El presente capítulo, siguiendo la línea argumental establecida en el Capítulo 1, se centra en describir las *simulaciones* realizadas y en discutir sus resultados, puesto que nuestro planteamiento del problema y su solución aproximada mediante un algoritmo evolutivo ya se ha descrito en el Capítulo 5.

El capítulo evalúa hasta qué punto y en qué cuantía el nuevo método propuesto para la asignación de usuarios a nodos en LTE funciona mejor que otros existentes en la literatura (Capítulo 3). En ésta se ha encontrado que hay dos grandes grupos de métodos: los basados en la calidad de la señal recibida por el usuario y los que realizan algún tipo de balanceo de carga mediante la transferencia de tráfico entre celdas. A efectos comparativos, en este capítulo, se considera un representante de cada grupo. Estos métodos de “referencia”, junto con el propuesto, se aplican, fundamentalmente en entornos urbanos y urbanos densos en redes LTE “convencionales” formados por macro-celdas¹, con un proceso de despliegue convencional y con una densidad de usuarios mucho mayor que la de eNBs.

Este capítulo se organiza de la forma siguiente: La Sección 7.1 comienza estableciendo qué métodos de referencia y qué métrica se han utilizado para comparar con el

¹Se habla aquí de macro-celda en sentido amplio, para diferenciarla del concepto de red heterogénea (HetNet) [34, 73, 74] o del de red ultra-densa (UDN), en las que la densidad de nodos puede ser del mismo orden de magnitud que la de usuarios, estando los nodos, por lo general, distribuidos al azar [75–77]. El paradigma UDN, uno de los puntales de 5G, se puede llevar a la práctica incrementando la densidad de nodos de “infraestructura” (desplegados por el operador) junto con la de los nodos de acceso (desplegados por usuarios) y los móviles de los usuarios funcionando como “*prosumers*”.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

método descrito en el Capítulo 5. Seguidamente, la Sección 7.2 presenta dos ejemplos en los que se pretende ilustrar en qué se diferencia de los métodos de referencia el propuesto en esta Tesis. La Sección 7.3 se centra en realizar un estudio de la sensibilidad de los parámetros del EA al cambiar de entorno (urbano y denso urbano). Con todos estos recursos, la Sección 7.4 presenta un conjunto de simulaciones en escenarios *realistas* en redes LTE convencionales. El estudio se centra fundamentalmente en entornos urbanos y urbanos densos, donde la asignación es más exigente en términos de capacidad. Aunque no es el objetivo principal de esta Tesis –centrada fundamentalmente en la etapa de dimensionamiento de redes LTE–, el método propuesto se ha aplicado en ejemplos sencillos que pretenden simular situaciones que pueden aparecer en redes ultra-densas, en las que la densidad de usuarios y nodos puede ser similar. La Sección 7.5 discute brevemente este aspecto. Finalmente, la Sección 7.6 resume las principales conclusiones de este Capítulo.

7.1 Marco de referencia: métodos convencionales y métrica de comparación

El problema, tal como se ha planteado en el Capítulo 5, consiste en asignar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs en redes LTE. En el marco general de redes de datos multi-celda, el problema de la asignación de terminales a nodos o “Problema de Asociación de Usuarios a Celdas” –*User-Cell Association Problem* (UCAP)– se suele modelar utilizando matrices cuyos elementos *binarios* codifican si un usuario está asociado (asignado) o no a un nodo (estación base, nodo de acceso), convirtiéndose así en un problema de *optimización combinatoria*¹ [73]. Para realizar la asignación de usuarios a celdas, se suelen considerar dos *métricas* diferentes –la velocidad instantánea alcanzable en la capa física y la carga de las celdas [86]– que, a su vez, dan lugar a dos grandes grupos de estrategias de asignación: las que, como el método CQI (*Channel Quality Indicator*), están basadas en la calidad de la señal recibida por el usuario (revisados en la Subsección 3.3.1) y las que, en diversas formas, tienen en cuenta el balance de carga –*Load Balancing* (LB)– entre celdas (Subsection 3.3.2). Un aspecto conceptual que tienen en común ambos grupos de métodos es que intentan asignar los usuarios a las celdas (ya sea de forma aproximada –método basado en CQI, muy utilizado en la industria– o exacta –en trabajos académicos, con hipótesis que les hacen difícilmente aplicables en situaciones reales–) mediante

¹La solución exacta es esencialmente imposible, incluso para redes móviles de tamaño mediano. Sólo si la red es lo suficientemente pequeña, el problema de la asociación óptima de usuarios se puede solucionar empleando una búsqueda de fuerza bruta [85].

7.1 Marco de referencia: métodos convencionales y métrica de comparación

la maximización de la velocidad o tasa instantánea de usuario.

En cambio, nuestra propuesta consiste en la minimización de la nueva métrica DTS (*Download Time of the complete System*). Hemos definido ésta en [36] como el tiempo máximo requerido por todos los usuarios del sistema para completar sus descargas (Expresión (5.5) de la página 89). Esta formulación es equivalente al problema de optimización combinatoria NP-hard descrito por la Expresión (5.6) con la restricción SUA (Single User Association). Dada su complejidad, se ha propuesto su resolución aproximada mediante el EA [36] descrito en el Capítulo 5.

Para establecer hasta qué punto el método propuesto PA (*Proposed Approach*) es mejor que un método convencional CA (*Conventional Approach*) –ya sea el basado en CQI (el más empleado en la industria) u otro más elaborado, como el CQI-LB– es necesario definir una *métrica de comparación* (Subsección 7.1.1) y establecer claramente la forma en la que funcionan éstos (Subsección 7.1.2).

7.1.1 Métrica de comparación

Para poder comparar de forma adecuada el comportamiento del método propuesto con el de uno convencional, se define la *disminución relativa* (%) de DTS (con respecto del de DTS que consigue el convencional de referencia) como

$$\Delta_{\text{DTS}}(\%) \doteq \frac{\text{DTS}_{\text{CA}} - \text{DTS}_{\text{PA}}}{\text{DTS}_{\text{CA}}} \cdot 100, \quad (7.1)$$

donde DTS_{CA} y DTS_{PA} representan los valores de la métrica DTS calculadas, respectivamente, con un método convencional CA (*Conventional Approach*) y con el propuesto PA (*Proposed Approach*). Nótese que esta disminución relativa es un efecto positivo: cuánto mayor sea Δ_{DTS} , mejor funciona el método propuesto (menor es el tiempo de descarga total) con respecto del convencional con el que se está comparando. En otras palabras, $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$, representa la *mejora* que se consigue *cuando se utiliza el método propuesto* con respecto del método convencional. La forma concreta en la que se calcula DTS_{CA} depende de la forma en la que funcionan los métodos convencionales de asociación usuario-celda.

7.1.2 Métodos convencionales de asociación usuario-celda

En el Capítulo 3, y, en concreto, en la Sección 3.3, se ha efectuado una revisión exhaustiva del problema de la asociación de usuarios a celdas, discutiendo las ventajas e inconvenientes de las diferentes estrategias. Fruto de esa revisión, y a efectos comparativos con la estrategia que proponemos en esta Tesis, hemos seleccionado los dos

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

métodos que siguen.

7.1.2.1 Método de comparación 1: Asignación basada en CQI

El primer método de comparación utilizado es el de asignación basado en CQI (o, equivalentemente en SINR), que asigna cada usuario al eNB para el que el usuario tiene el mejor CQI (mejor SINR). Este es el método de asignación usuario-celda más sencillo y más utilizado en la industria [83, 87]. Se engloba dentro de las estrategias de asociación usuario-celda basada en la calidad de la señal (cuyo estado del arte ya se ha revisado en la Subsección 3.3.1). Sin embargo, algunos autores, como Kim *et al.* [90], sugieren que podría ser un método excesivamente simple en el sentido en el que *no* tienen en cuenta la carga actual de los eNBs. Esa es una de las causas por las que se proponen, sobre todo en el ámbito académico, estrategias basadas en el balanceo de carga revisadas en la Subsección 3.3.2.

7.1.2.2 Método de comparación 2: CQI-LB

El segundo enfoque se basa en una combinación de CQI y de una técnica de balanceo de carga que hemos propuesto en [36], y en la que los usuarios se asocian al eNBs de la siguiente manera.

Sea \mathcal{L}_B^{max} la carga *máxima* que cualquier eNB puede soportar. $\gamma \cdot \mathcal{L}_B^{max} \equiv \mathcal{L}_B^{min}$ representa un límite inferior para el que se considera que cualquier eNB está poco cargado. “Poco cargado” significa aquí que, por mera conveniencia, se ha considerado que $\gamma = 0.5$, es decir, el eNB está a la mitad de su carga máxima \mathcal{L}_B^{max} . Variando el valor del parámetro γ se pueden estudiar diferentes situaciones de carga.

Sea cual sea la asignación de los usuarios a los nodos, y puesto que (1) los usuarios están localizados aleatoriamente en el área de servicio, (2) sus correspondientes valores de CQI son aleatorios y (3), en general, los servicios demandados pueden ser distintos, entonces la carga en cada nodo es una variable aleatoria que se puede caracterizar mediante diferentes estadísticos. Por simplicidad se han considerado el valor medio y la varianza.

A este respecto, se define el valor de carga asociado a una cierta asociación usuarios-eNBs, representada por el vector de asignación \mathbf{A}_k , como $\mathcal{L}_B^{\mathbf{A}_k} = \text{E}[\mathcal{L}_{B_k}]^{\mathbf{A}_k} + \text{Var}[\mathcal{L}_{B_k}]^{\mathbf{A}_k}$, donde $\text{E}[\mathcal{L}_{B_k}]^{\mathbf{A}_k}$ y $\text{Var}[\mathcal{L}_{B_k}]^{\mathbf{A}_k}$ son, respectivamente, el valor medio y la varianza de la carga calculada en todos los eNB para el vector de asignación \mathbf{A}_k .

Para cada usuario se dispone de una lista de eNBs (a los que potencialmente se podría asignar) ordenados en valor decreciente de CQI. Cuando se inicia el algoritmo, cada

7.2 Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos

usuario u_l se asigna al eNB B_k para el cual tiene mejor (mayor CQI). El correspondiente vector de asignación se denota \mathbf{A}_{CQI} . Con esa primera asociación, se puede calcular los valores de las cargas en cada eNB ($\mathcal{L}_{B_k}, \forall B_k$) y del umbral de carga inicial $\mathcal{L}_B^{\mathbf{A}_{\text{CQI}}}$

A continuación se inicia el siguiente proceso:

1. Si $\forall u_l$ y $\forall B_k$ la carga resulta ser $\mathcal{L}_{B_k} \leq \gamma \cdot \mathcal{L}_B^{\text{max}}$, entonces esa asociación usuario-eNB no afecta significativamente a la carga (celda poco cargada, $\gamma = 0.5$), y el algoritmo converge hacia la asignación basada en CQI, \mathbf{A}_{CQI} .
2. Sin embargo, si hay algún elemento del vector de asignación, por ejemplo, el w -ésimo, que codifica que el usuario u_w está asociado, digamos que, al eNB B_z ($u_w \in B_z$), de forma que se supera el umbral de carga, entonces el usuario u_w ya *no* se asigna a B_z sino que se asigna al *siguiente* eNB para el que u_w tenga el mejor CQI. Sea \mathbf{A}_q el correspondiente vector de asignación. Con esta nueva asignación, se calcula el valor de $\mathcal{L}_B^{\mathbf{A}_q}$, que representa la nueva asignación usuarios-celda en el área de servicio. Este proceso se repite hasta calcular la asignación que minimiza $\mathcal{L}_B^{\mathbf{A}_q}$.

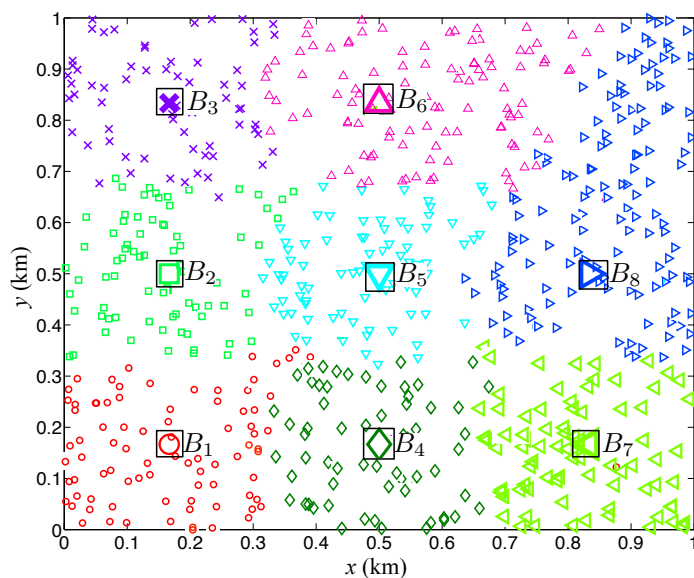
7.2 Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos

El objetivo de esta sección es ilustrar el funcionamiento del método propuesto, en dos casos sencillos, sin entrar en detalles particulares que dejaremos para la Sección 7.4. El primer ejemplo sencillo es una distribución uniforme de usuarios (Sección 7.2.1), mientras que el segundo, corresponde a otra situación en la que los usuarios tienden a concentrarse alrededor de un cierto nodo con una cierta distribución gaussiana (Subsección 7.2.2).

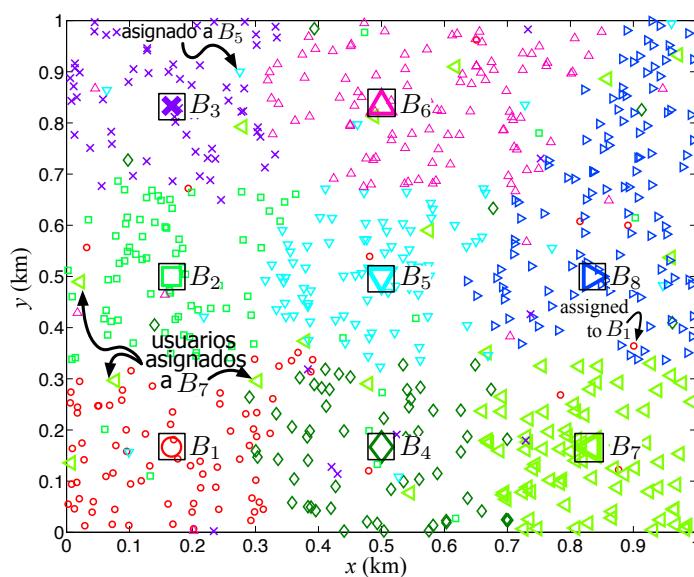
7.2.1 Distribución uniforme de usuarios

El objetivo de este ejemplo es ilustrar gráficamente cómo el método propuesto asigna usuarios a eNBs de forma distinta a como lo hace el método convencional basado en CQI. La Figura 7.1 pretende ilustrar esas diferencias. Intuitivamente, si un usuario u_l está más cerca del eNB B_k , es probable que su SINR, respecto a B_k , sea mejor (mayor) que la de otro usuario que está más lejos (y, por tanto, el correspondiente valor de CQI).

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS



(a)



(b)

Figura 7.1: (a) Asignación de usuario conseguida mediante método convencional (CA) basado en CQI. (b) Asignación obtenida por la estrategia propuesta (PA). En ambos casos, el área de servicio $\mathcal{A} = 1 \text{ km}^2$, con $\mathcal{N}_B = 8$ eNBs, $\mathcal{N}_U = 698$ usuarios activos, con distribución uniforme).

7.2 Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos

Para tener una idea intuitiva de cómo este método difiere del propuesto, se han representado en la Figura 7.1 las asociaciones usuario-eNB conseguidas utilizando, respectivamente, el método basado en CQI (a) y el método propuesto PA (b). Ambas corresponden a un área de servicio $\mathcal{A} = 1 \text{ km}^2$ con $\mathcal{N}_B = 8$ eNBs y $\mathcal{N}_U = 698$ usuarios activos distribuidos aleatoriamente (con distribución uniforme). Cada eNB se ha representado con un cuadrado \square que contiene un cierto símbolo ($\circ, \cdot, \diamond, \triangleright, \dots$). Por ejemplo, el eNB B_4 de la Figura 7.1 (a) se ha representado con un cuadrado que contiene el símbolo \diamond . Nótese que todos los usuarios que se asignen a dicho eNB se representan también con el símbolo \diamond . Es decir, el *convenio de representación* adoptado consiste en *representar cada usuario con el mismo símbolo del eNB al cual ha sido asignado*. Esta convenio de representación ayuda a analizar y entender las diferentes asignaciones conseguidas por el método de asignación basado en CQI y por el propuesto.

Como era de esperar, en el método convencional basado en CQI –Figura 7.1 (a)–, los usuarios se asignan básicamente a los eNBs más cercanos. Sin embargo en el método de asignación propuesto PA –Figura 7.1 (b)– hay algunos usuarios que *no* se asignan al eNB más cercano, sino a otro más lejano, al contrario que la Figura 7.1 (a), donde estos usuarios se asignaron al más cercano, con mejor CQI. Por claridad, solo hemos resaltado algunos de esos usuarios en la Figura 7.1 (b): entre los eNBs B_1 y B_2 se puede observar que hay algunos usuarios (los señalados con flechas) que el método propuesto ha asignado al nodo B_7 , mientras que, en la Figura 7.1 (a), esos mismos usuarios estaban asignados a nodos más cercanos. Estas figuras muestran cómo con la misma ubicación de usuarios (localización física en el espacio (x, y)), tales usuarios pueden ser asociados a eNB diferentes dependiendo del algoritmo utilizado. El hecho por el que la metodología propuesta asigna a ciertos usuarios a eNBs “distantes” resulta en un mejor (más bajo) DTS, como se mostrará más adelante.

Siguiendo en la línea ilustrativa de esta sección, la Figura 7.2 representa la *función de coste a minimizar*, es decir el tiempo global o tiempo de descarga total del sistema, DTS, en segundos, en función del número de generaciones del EA. La línea roja representa, para cada generación, el DTS promedio de los individuos de la población, mientras que la línea azul corresponde al mejor DTS. La línea negra discontinua muestra el valor de DTS calculado utilizando el enfoque convencional de asignación basado en CQI. Esta línea es constante porque el método convencional basado en CQI es *determinista*. Nótese que, para una distribución espacial de usuarios, el algoritmo calcula una matriz **CQI** de orden $\mathcal{N}_B \times \mathcal{N}_U$, en la que cada elemento $\text{CQI}_{i,j}$ representa el CQI que tendría un usuario u_j si fuese asignado al eNB B_i . En el método CQI, cada usuario se asigna al eNB para el cual tiene mejor CQI. Con esta asociación, se calcula DTS_{CQI} . Si el

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

proceso de asignación se repite otra vez, como la matriz **CQI** sigue siendo la misma, el resultado de asociación usuario-eNB es exactamente el mismo, y en consecuencia, DTS_{CQI} *no* varía. Esta es la razón por la que iterar el método CQI produce la línea negra constante, que es independiente de la iteración (generación).

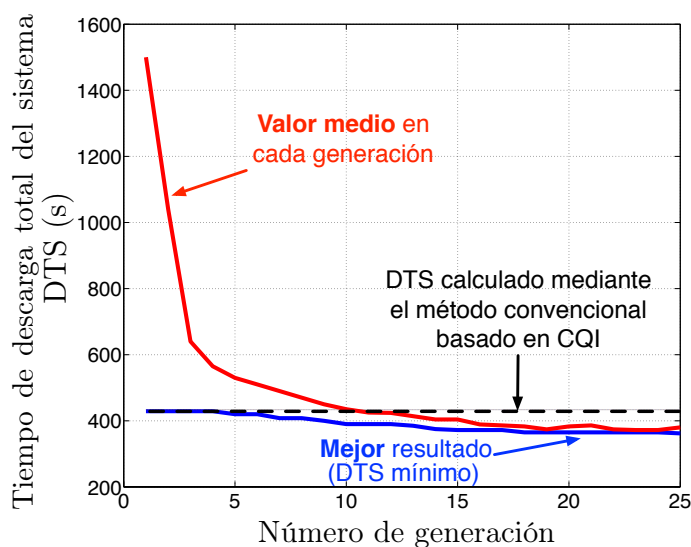


Figura 7.2: Tiempo de descarga total del sistema, DTS(s), en función del número de generación de EA propuesto. La línea de color rojo representa, para cada generación, el valor medio, mientras que la línea azul corresponde al mejor (menor DTS). La línea negra constante muestra el valor de DTS usando el método basado en CQI.

Por el contrario, el método propuesto, PA, basado en un EA es *estocástico*. El EA comienza con una población inicial, que se genera, con ciertas probabilidades de mutación y cruce, a partir de una solución sub-óptima convencional (de la forma indicada en la Sección 5.3.2.2, pag. 96). Dicha población inicial se evoluciona mediante la aplicación de los operadores de cruce, mutación y selección, que se aplican también con ciertas probabilidades. Como se puede observar en la Figura 7.2, ya desde las primeras generaciones, el resultado de cada generación se hace rápidamente mejor (DTS disminuye), y termina convergiendo a una solución sub-óptima, mejor que la ofrecida por el método convencional. Como el EA es estocástico, el resultado, DTS, termina siendo una variable aleatoria. Para caracterizarla, el EA se ha ejecutado 20 veces, con el objetivo

7.2 Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos

de poder obtener valores estadísticamente significativos.

En el caso ilustrado, se ha considerado que el tamaño de archivo a descargar es de 1 MB ($\mathcal{F}_{\text{size}} = 1 \text{ MB}$), y que la tasa de bits máxima es $R_{b,\text{peak}} = 10 \text{ Mbps}$. Como se puede observar en la Figura 7.2, el método propuesto funciona mejor que el método de comparación basado en CQI, en el sentido de que consigue una solución (una asignación de los N_U usuarios a las N_B eNBs) con un *menor valor* de DTS: todos los usuarios *en conjunto* son capaces de descargar sus archivos en aproximadamente $\text{DTS}_{\text{PA}} \approx 362.659 \text{ s} < 441.411 = \text{DTS}_{\text{CQI}}$, que requerirían si se utilizase la asignación proporcionada por el método convencional basado en CQI.

El hecho de que $\text{DTS}_{\text{PA}} \approx 362.659 \text{ s} < 441.411 = \text{DTS}_{\text{CQI}}$ se debe a que el método basado en CQI asigna a cualquier usuario *primero* al eNB para el que tiene el mayor CQI, y entonces, con tal asociación, calcula el TBS y DTS asociados. Se trata de una diferencia clave cuando se compara con el método propuesto en el que los usuarios se asignan con el objetivo de minimizar su DTS y *no* de maximizar su CQI. Esta es la razón por la que hay algunos usuarios –tales como los mostrados en la Figura 7.1 (b)– que no se asignan al eNB con mejor CQI. De esta manera se ayuda a reducir la carga en aquellas celdas con demasiados usuarios, lo que, en definitiva hace que los usuarios del sistema, como un todo, terminen antes de descargar sus contenidos. A este respecto, el método propuesto introduce cierta *equidad* en el reparto de recursos, como sucede en otras investigaciones (véase al respecto la revisión efectuada en el Apartado 3.3.2.2, pag. 59).

7.2.2 Distribución gaussiana de usuarios

En este ejemplo se compara el método propuesto con el método de asignación basada en CQI-LB descrito en la Subsección 7.1.2.2. El objetivo de este ejemplo es explorar la peor (aunque posible) situación en la que los usuarios tienden a concentrarse alrededor de un eNB, por ejemplo, cuando hay un concierto, un evento deportivo, etc. Esta distribución de usuario tipo “hotspot” se puede ver como un caso límite para un despliegue con macro-celdas, cuyo propósito es ilustrar que el método propuesto podría alcanzar soluciones viables a este problema, incluso en casos extremos. En este ejemplo, los usuarios están distribuidos alrededor de un eNB central, en este caso, B_3 , siguiendo una distribución gaussiana (\mathcal{G}) con valor medio $\mu_{\mathcal{G}} = (0.5 \text{ km}, 0.5 \text{ km})$ y desviación estándar $\sigma_{\mathcal{G}} = (0.05 \text{ km}, 0.05 \text{ km})$. Con dicha distribución de usuarios, la Figura 7.3 muestra la asignación usuario-eNB conseguida mediante el método convencional CQI-LB (a) y la proporcionada por el método propuesto (b).

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

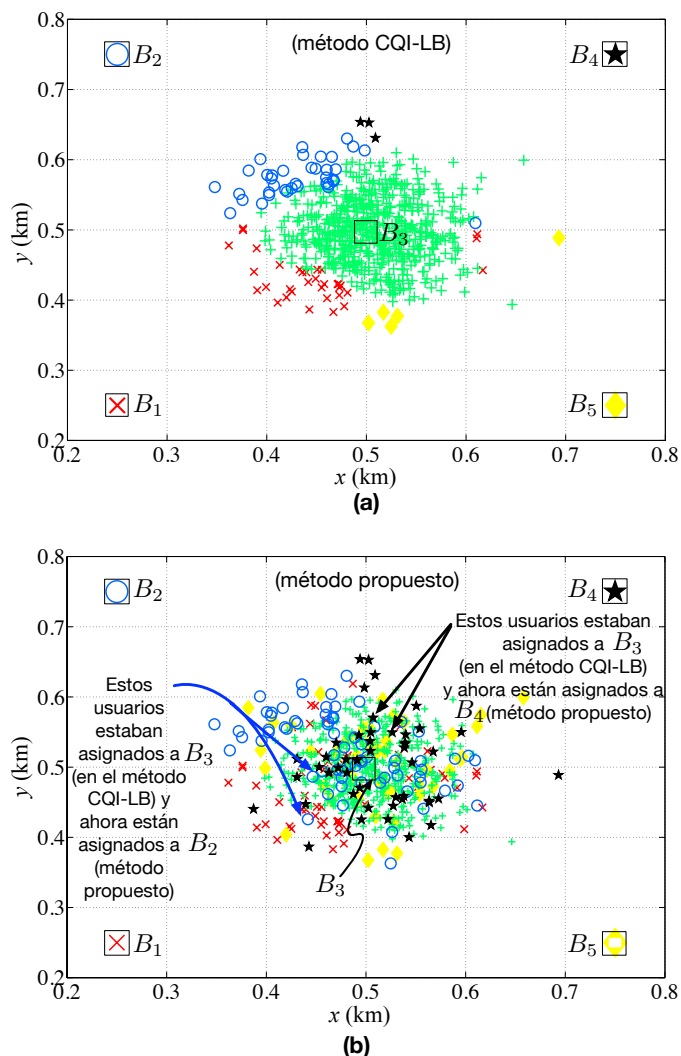


Figura 7.3: Asignación usuario-eNB en el caso de estudio en el que los clientes se localizan alrededor de B_3 con una distribución gaussiana (9) con valor medio $\mu_{\mathcal{G}} = (0.5 \text{ km}, 0.5 \text{ km})$ y desviación estándar $\sigma_{\mathcal{G}} = (0.05 \text{ km}, 0.05 \text{ km})$. (a) Asignación obtenida mediante CQI-LB. (b) Asignación de usuarios obtenida mediante la metodología propuesta.

Obsérvese en la Figura 7.3 (a) que el método CQI-LB asigna la mayor de los usuarios (etiquetados con el símbolo $+$) al eNB B_3 , alrededor del cual se encuentran con la distribución \mathcal{G} . En cambio, en la Figura 7.3 (b), el método propuesto PA asigna muchos de esos usuarios a otros nodos: por ejemplo los usuarios señalados con flechas y etiquetados, por ejemplo, con \star o con \circ , resultan ser asignados por el método propuesto

7.2 Comparación con los métodos convencionales: ejemplos ilustrativos

al eNB B_4 y B_2 , respectivamente. En la Figura 7.3 (b), por claridad, sólo se han señalado algunos de los usuarios que son asociados a eNBs de distinta forma que con el método CQI-LB de la Figura 7.3 (a).

Lo verdaderamente interesante de la asignación propuesta (Figura 7.3 (b)) es que permite aligerar la carga en el eNB B_3 (representado por un el símbolo $+$ dentro de \square) debido a que asigna muchos de los usuarios distribuidos alrededor de B_3 –aquellos con símbolos \cdot , \circ , \diamond , \star en la Figura 7.3 (b)– a B_1 , B_2 , B_4 , y B_5 , respectivamente.

El método de asignación propuesto se traduce en un tiempo de descarga total del sistema menor que el que se consigue con el método CQI-LB. En concreto, $DTS_{PA} = 298.315 \text{ s} < DTS_{CQI-LB} = 388.8 \text{ s}$, lo que refleja que los recursos del operador se han utilizado de forma más eficiente y, a la vez, los usuarios, en conjunto, han recibido un servicio global mejor, disminuyendo las diferencias entre usuarios.

En términos relativos, utilizando la métrica de comparación $\Delta_{DTS}(\%)$ –Expresión 7.1–, el método propuesto consigue una *mejora* (una *disminución* de DTS) *relativa* (con respecto del método CQI-LB) del 23.27 %, que es una mejora muy considerable.

La cuestión que se plantea ahora es si la metodología propuesta funciona mejor o no que la convencional en una conjunto suficientemente variado de escenarios realistas, como aquellos a los que se enfrentan habitualmente los operadores móviles. Los métodos convencionales basados en CQI y LB obtienen soluciones sub-óptimas *similares* en escenarios reales correspondientes a redes convencionales de macro-celdas¹. Este resultado está en concordancia con [76]. Por esta razón, en la Sección 7.4, que se centra en despliegues convencionales, se utiliza como método convencional el método basado en CQI. Aunque ya hemos establecido qué significa en esta tesis “método convencional”, sin embargo, no está tan claro a qué nos referimos cuando hablamos de red “convencional”. Llamamos aquí red “convencional” a una red en la que los usuarios, aunque localizados aleatoriamente, tienen una distribución *homogénea*, los eNBs están localizados de forma (aproximadamente) regular, y las densidades de usuarios son mucho mayores que las de nodos². Sin embargo, como se verá en la Sección 7.5, que pretende simular situaciones

¹El concepto de macro-celda se utiliza aquí en sentido amplio para distinguirla de las redes HetNet [34, 73, 74] o de las ultra-densas (UDNs).

²La *densificación* de la infraestructura que requiere el paradigma UDN se puede conseguir aumentando la densidad de nodos de infraestructura (desplegados por el operador) junto con la de los ANs (desplegados por usuarios) y los móviles de los usuarios funcionando como prosumers. Esta densificación junto con la utilización de MIMO masivo son las piedras angulares de las redes de 5G [76, 78–81], aumentando la capacidad en varios órdenes de magnitud [75, 76, 82]. El problema UCAP en HetNets –en el que las celdas “pequeñas” (pico, femto) de menor potencia, con un despliegue generalmente no planificado, están embebidas dentro del despliegue convencional de macro-celdas [83]– también es *diferente* de las redes de macro-celdas [73].

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

que pueden aparecer en redes de tipo UDN y HetNet, el método CQI-LB funciona mejor que el método basado en minimizar CQI, aunque peor que el método propuesto. La Sección 7.5 es meramente ilustrativa y pretende solo realizar un estudio preliminar de la versatilidad del método propuesto en redes del tipo UDN, que están fuera del objeto de investigación de esta Tesis.

Para proceder a un estudio exhaustivo de la bondad (o no) del método de asignación de usuarios propuesto para redes LTE en entornos realistas como aquellos a los que se enfrentan los operadores, es necesario primero calcular los valores de ciertos parámetros característicos del EA y ver si éstos dependen o no, y en qué cuantía, de las características del entorno a simular (urbano y urbano denso, fundamentalmente). Ese es precisamente el objetivo de la Sección 7.3 siguiente.

7.3 Sensibilidad de parámetros del EA respecto del entorno

El problema, tal como se ha planteado en el Capítulo 5, consiste en asignar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs mediante la minimización de la métrica DTS (*Download Time of the complete System*), definida como el tiempo máximo requerido por todos los usuarios del sistema para completar sus descargas (Expresión (5.5) de la página 89). Esta formulación es equivalente al problema de optimización combinatoria NP-hard, descrito por la Expresión (5.6) con la restricción SUA (Single User Association). Dada su complejidad, se ha propuesto su resolución aproximada mediante el EA descrito en el Capítulo 5.

El objetivo de esta sección consiste en analizar si existe o no alguna dependencia de los parámetros p_{mut} , p_{cross} y $\mathcal{P}_{\text{size}}$ del EA con respecto del tipo de entorno o *clutter* concreto en el problema de asignación de usuarios a eNBs. El concepto de clutter se refiere aquí no sólo a las distintas densidades de usuarios sino también a las diferentes características de propagación que hay en zonas tan distintas como las zonas rurales o las zonas urbanas “densas”. A este respecto, la Tabla 7.1 resume los valores de los parámetros más significativos de cada tipo de entorno.

Los entornos de la Tabla 7.1 son denso urbano (DU), urbano (U) y rural (R). $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ representa la densidad de población (habitantes/km²) mientras que $\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ es la correspondiente densidad de usuarios activos. $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$ es el *número óptimo* de eNBs para proporcionar *cobertura* [51, 56]. \mathcal{A}_{CLU} es el área de cada entorno, en km². Nótese que, en el entorno rural (R), el número óptimo de eNBs para proporcionar cobertura ha resultado ser $\mathcal{N}_B^{\text{opt,R}} = 1$ eNB. Esta es la razón por la que en el presente estudio de sensibilidad no se tiene en cuenta el entorno rural debido a que, al haber un único nodo, todos los usuarios se asignan a éste, con independencia del método de asociación que se

7.3 Sensibilidad de parámetros del EA respecto del entorno

emplee.

Tabla 7.1: Datos utilizados para los diferentes tipos de entorno o “clutter”: denso urbano (DU), urbano (U), and rural (R). $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ representa la densidad de población (habitantes/km²) mientras que $\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ es la correspondiente densidad de usuarios activos. $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$ es el número óptimo de eNBs para proporcionar cobertura [51, 56]. \mathcal{A}_{CLU} es el área de cada entorno, en km².

Tipo de entorno o clutter	$\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ (habitantes/km ²)	\mathcal{A}_{CLU} (km ²)	$\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$	$\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$ (UE/km ²)
DU	7000	1	5	697
U	4500	6	9	83
R	300	25	1	20

En esta sección, a efectos comparativos, se particulariza la Expresión (7.1) para el método convencional basado en CQI (CA = CQI), de forma que

$$\Delta_{\text{DTS}}(\%) \doteq \frac{\text{DTS}_{\text{CQI}} - \text{DTS}_{\text{PA}}}{\text{DTS}_{\text{CQI}}} \times 100, \quad (7.2)$$

donde DTS_{CQI} y DTS_{PA} representan los valores de la métrica DTS calculadas, respectivamente, con el método CQI y con el método propuesto, PA. Nótese que cuánto mayor sea Δ_{DTS} , mejor funciona el método propuesto (menor es su tiempo DTS_{PA}) con respecto del convencional con el que se está comparando. Es decir, si DTS_{PA} disminuye ($\text{DTS}_{\text{PA}} \downarrow$) – *descarga global más rápida, en menos tiempo*– frente a DTS_{CQI} , entonces $(\text{DTS}_{\text{CQI}} - \text{DTS}_{\text{PA}}) \uparrow \Rightarrow \Delta_{\text{DTS}} \uparrow$. Así, $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$, representa la *mejora* que se consigue *cuando se utiliza el método propuesto* con respecto al método CQI.

Con esta consideración, la Figura 7.4 representa $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$ (la mejora porcentual del método propuesto PA con respecto al convencional basado en CQI), en función de la probabilidad de mutación, p_{mut} , en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U). El aspecto interesante a notar en la Figura 7.4 es que, en ambos entornos, el máximo de $\Delta_{\text{DTS}}(\%)$ se produce cuando $p_{\text{mut}} = 0.02$. Este resultado sugiere que la sensibilidad de p_{mut} con respecto a la variación del tipo de entorno (urbano, urbano denso) no es relevante. Por ello, el resto del trabajo experimental se realiza con $p_{\text{mut}} = 0.02$.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

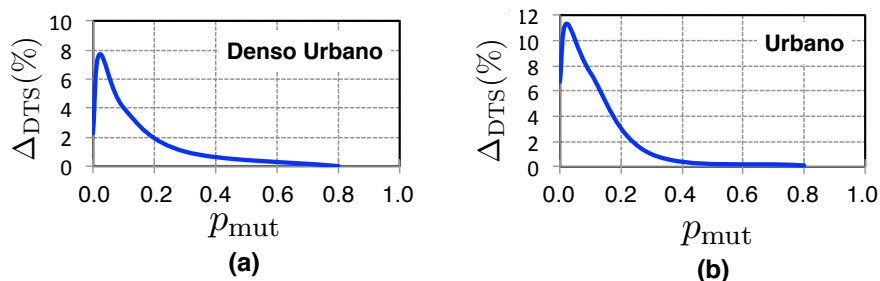


Figura 7.4: Mejora porcentual del método propuesto (PA) con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{DTS}(\%)$ –Expresión (7.2)–, en función de la probabilidad de mutación, p_{mut} , en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U).

De la misma forma, la Figura 7.5 representa la mejora porcentual del método propuesto con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{DTS}(\%)$, en función de la probabilidad de cruce, p_{cross} , en un entorno denso urbano (a) y en un entorno urbano (b), respectivamente. De forma similar a lo que ocurre en la Figura 7.4, el punto clave a tener en cuenta es que, en ambos entornos, el valor óptimo se obtiene para el *mismo valor*, cuando $p_{cross} = 0.2$, por lo que este valor se ha seleccionado para los siguientes experimentos.

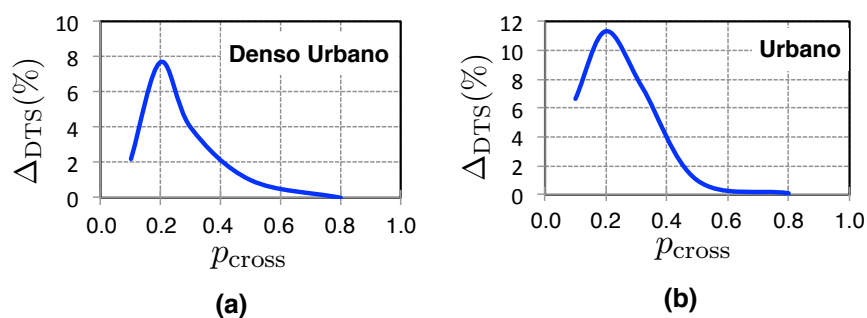


Figura 7.5: Mejora porcentual del método propuesto PA con respecto al convencional basado en CQI, $\Delta_{DTS}(\%)$ –Expresión (7.2)– en función de la probabilidad de cruce, p_{cross} , en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U).

Finalmente la Figura 7.6 representa Δ_{DTS} (%) en función del tamaño de población, \mathcal{P}_{size} , en (a) un entorno DU y (b) un entorno U. Cada punto de las gráficas corresponde al mejor resultado alcanzado después de realizar simulaciones en las que se ha variado el tamaño de la semilla y la probabilidad de mutación implicada en la generación de la población inicial. Ambas figuras muestran que la configuración óptima para el tamaño de la población inicial es $\mathcal{P}_{size} = 100$ individuos. De manera similar a las figuras anteriores, el resultado sugiere que la sensibilidad de \mathcal{P}_{size} respecto al tipo de entorno es despreciable. A partir de este punto, en los estudios que siguen, se considera que $\mathcal{P}_{size} = 100$ individuos.

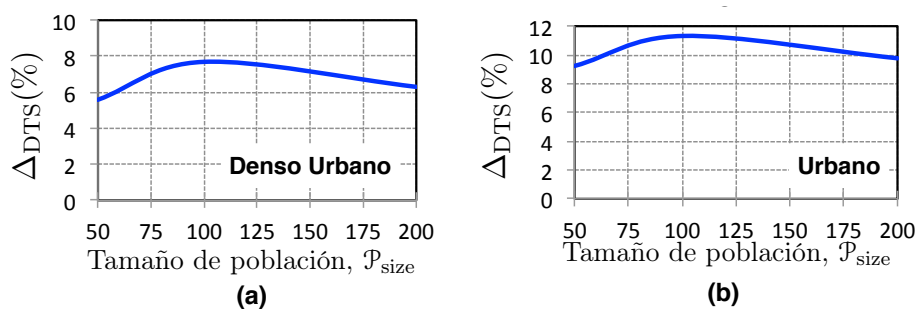


Figura 7.6: Mejora porcentual del método propuesto con respecto al convencional basado en CQI, Δ_{DTS} (%) –Expresión (7.2)–, en función de la probabilidad del tamaño de población, \mathcal{P}_{size} , en (a) un entorno denso urbano (DU), y (b) en un entorno urbano (U).

7.4 Simulaciones en redes LTE convencionales

Se entiende aquí por redes convencionales aquellas en las que el número de nodos es mucho menor que el de usuarios, que se encuentran distribuidos de forma homogénea en el áreas de servicio. Por contra, en las redes emergentes ultra-densas puede suceder que la densidad de usuarios y de nodos sea del mismo orden de magnitud y que la distribución de nodos no sea homogénea. Este es un tipo de red que está surgiendo en redes 5G y que, aunque está fuera del objetivo de esta tesis, estudiamos a efectos ilustrativos en la Sección 7.5.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

7.4.1 Marco de referencia y observaciones preliminares

La asignación de usuarios es más compleja en aquellos escenarios en los que hay un número elevado de usuarios activos, ya que es probable que haya algunos eNBs que estén más cargados que otros si la asignación se basa en maximizar el CQI de los usuarios en vez de en minimizar la función DTS. Este escenario ocurre típicamente en ciudades con gran población que, por lo general, tienen dos tipos de entornos en función de la densidad de población y del grado de complejidad de las condiciones de propagación: urbano (U) o urbano denso (DU). Los entornos urbanos densos tienen una densidad de población muy elevada (> 5000 habitantes/km²), y se corresponden con la parte de la ciudad que tiene edificios muy altos (altura media superior a 40m) y densamente distribuidos. Los entornos urbanos tienen también gran densidad de población (aunque menor que los DUs) y, por lo general, consisten en grandes edificios (cuya altura media no supera 40 m), oficinas, centros comerciales, etc. Ambos entornos tienen en común una alta densidad de usuarios activos y, por lo tanto, fuertes requisitos en términos de demanda de capacidad. Esto hace que los escenarios DU y U sean de especial relevancia.

Cada uno de los entornos tienen, por tanto, diferente densidad de población, $\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$ (habitantes/km²). Sin embargo, la densidad de usuarios activos es solo una fracción de la densidad de población total. La densidad de usuarios activos depende no solo del entorno sino también de otros parámetros como, por ejemplo, la tasa de mercado (“*market share*”) del operador bajo consideración ($\mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}}$), la penetración de un servicio S_i en el mercado (“*market penetration*”) ($\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$), el factor de sobrecarga (“*overload factor*”), \mathcal{O}_F , o el porcentaje de usuarios activos simultáneos. Con estas consideraciones, la densidad de usuarios activos simultáneos para un servicio S_i en un cierto clutter se puede modelar como

$$\rho_{A,U}^{S_i} = \rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}} \cdot \mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} \cdot \mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i} \cdot \mathcal{O}_F, \quad (7.3)$$

siendo la *fracción* de usuarios con el servicio S_i

$$\gamma^{S_i} = \frac{\rho_{A,U}^{S_i}}{\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}} = \mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} \cdot \mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i} \cdot \mathcal{O}_F. \quad (7.4)$$

Se han considerado cuatro perfiles de usuario realistas que generan cuatro servicios diferentes, $S_i = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$. Las características de éstos se han descrito en la Tabla 7.2. Como se indica en la Expresión (2.2), la tasa de descarga de usuario está limitada por la tasa de pico del correspondiente servicio, $R_{b,\text{peak}}^{S_i}$, cuyos valores también se muestran en la Tabla 7.2. Se ha asumido además que: 1) el tamaño del archivo de descarga

7.4 Simulaciones en redes LTE convencionales

es 1 MB ($\mathcal{F}_{\text{size}} = 1 \text{ MB}$); y 2) que $\mathcal{O}_F = 10\%$ y $\mathcal{M}_{\text{share}}^{\text{Ope}} = 31.8\%$ (“market share” de un operador español [193]).

Tabla 7.2: Resumen de parámetros característicos de los servicios analizados en este trabajo. $R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ es la tasa pico del servicio S_i , mientras que $\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ y γ^{S_i} representan, respectivamente, la tasa de penetración del servicio S_i y la fracción de usuarios activos (respecto a la población total) con dicho servicio S_i .

Servicio S_i	$R_{\text{b,peak}}^{S_i}$ (Mbps)	$\mathcal{M}_{\text{pen}}^{S_i}$ (%)	γ^{S_i} (%)
S_1	10	107	34.07
S_2	1	70	22.29
S_3	0.1	67	21.35
S_4	20	70	22.29

Con estas consideraciones, el diseño de experimentos es el siguiente.

7.4.2 Diseño de experimentos

Tal y como se ha descrito, cada entorno tiene una densidad de usuarios activos característica, que se ha expuesto en la Tabla 7.1. Dado que, en el medio rural, el radio de cobertura R_C de un eNB es mucho mayor que en entornos U y DU [51, 56], es conveniente considerar un área representativa para cada entorno, \mathcal{A}_{CLU} (km²). Estas áreas se han listado en la Tabla 7.1 junto con otros parámetros característicos como la densidad de población ($\rho_{\text{pop}}^{\text{CLU}}$), la densidad de usuarios activos ($\rho_{\text{U}}^{\text{CLU}}$) o el número óptimo de eNBs para lograr cobertura en cada entorno, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$.

A su vez, para cualquier área considerada, \mathcal{A}_{CLU} , se ha calculado el radio celular, R_C , necesario para proporcionar cobertura en todo el área [51, 56]. Este se obtiene calculando la Máxima Pérdida de Propagación Permitida, MAPL (*Maximum Allowable Path Loss*), es decir, la pérdida máxima de propagación que se produce cuando el nivel

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

de potencia recibida (P_R (dBm)) por el usuario más alejado (situado en $d_{u_i, B_k} = R_C$) es simplemente la sensibilidad del receptor (S (dBm)):

$$P_R = S = P_E - L^{\text{PM}}(R_C) - \sum_{\delta} L_{\delta} + \sum_{\tau} G_{\tau}, \quad (7.5)$$

donde L^{PM} viene determinado por el modelo de propagación de dos pendientes establecido en la Expresión (6.3), y $\sum_{\delta} L_{\delta}$ y $\sum_{\tau} G_{\tau}$ representan los sumatorios de las restantes pérdidas y ganancias, respectivamente.

Usando este método, en cada área representativa \mathcal{A}_{CLU} , se ha calculado el número mínimo (óptimo) de eNBs para dar cobertura por propagación radio en cada tipo de entorno, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$. Este valor ha resultado ser 5 eNB para entorno DU, 9 eNB para entorno U y 1 eNB para entorno R, como se ha mostrado en la Tabla 7.1.

Una vez definidos los diferentes tipos de entorno, servicios y el número mínimo de eNBs para dar cobertura en cada entorno, se ha llevado a cabo el siguiente trabajo experimental:

1. Para cada entorno considerado, se han generado, al azar, 10 distribuciones de usuarios distintas. En concreto, se han obtenido 10 realizaciones de la variable aleatoria que describe la ubicación de usuarios en el área \mathcal{A}_{CLU} , con distribución uniforme \mathcal{U} .
2. Para cada de esas distribuciones espaciales de usuarios:
 - Se ha ejecutado una (1) sola vez el algoritmo con el método convencional (CA) basado en CQI ya que este método es determinista. La razón es la siguiente. Para una distribución espacial de usuarios en el área \mathcal{A}_{CLU} , el algoritmo calcula una matriz **CQI** de orden $\mathcal{N}_B \times \mathcal{N}_U$, en la que cada elemento $\text{CQI}_{i,j}$ representa el CQI que tendría un usuario u_j si fuese asignado al eNB B_i . En el método CQI, cada usuario es asignado al eNB para el cual tiene mejor CQI. Con esta asociación, se calcula DTS_{CQI} . Si el proceso de asignación se repite otra vez, como la matriz **CQI** sigue siendo la misma, el resultado de asociación usuario-eNB es exactamente el mismo, y en consecuencia, $\text{DTS}_{\text{CA}=\text{CQI}}$ *no* varía. Esta es la razón por la que iterar el método CQI produce la línea negra constante, que es independiente de la iteración (generación).
 - Se han ejecutado 20 repeticiones del algoritmo evolutivo EA que resuelve el problema de asociación usuario-celda mediante la aproximación PA pro-

puesta en el Capítulo 5. La razón es que el método propuesto, PA, basado en un EA es *estocástico*. El EA comienza con una población inicial, que se genera, con ciertas probabilidades de mutación y cruce, a partir de una solución sub-óptima convencional (de la forma indicada en la Sección 5.3.2.2, pag. 96). Dicha población inicial se evoluciona mediante la aplicación de los operadores de cruce, mutación y selección, que se aplican también con ciertas probabilidades. Como se puede observar en la Figura 7.2, ya desde las primeras generaciones, el resultado de cada generación se hace rápidamente mejor (DTS disminuye), y termina convergiendo a una solución sub-óptima, mejor que la ofrecida por el método convencional. Como el EA es estocástico, el resultado, DTS, termina siendo una *variable aleatoria*. Para caracterizarla, el EA se ha ejecutado 20 veces, con el objetivo de poder obtener valores estadísticamente significativos.

3. Finalmente, después de calcular los valores mencionados anteriormente en las 10 distribuciones diferentes de usuarios, se calculan los valores medios (sobre las 10 distribuciones) para ambos métodos, obteniendo \overline{DTS}_{CA} and \overline{DTS}_{PA} .

Una vez completada la descripción de la configuración de los experimentos, se puede empezar a comparar el método propuesto PA con los resultados que ofrece el método convencional CA basado en CQI, el más utilizado en la industria. En los apartados que siguen se compara ambos métodos en: 1) entornos U y DU en los, respectivamente, se ha realizado un despliegue con el número óptimo (mínimo) de eNBs (Subsección 7.4.3); y 2) en entornos U y DU en los que se se explora cómo afecta al rendimiento la utilización de un número de nodos distinto del correspondiente óptimo en cada entorno (Subsección 7.4.4).

7.4.3 Eficiencia del método propuesto en despliegues óptimos

La Figura 7.7 (a) representa el valor medio de DTS, \overline{DTS} (s), calculado sobre 10 distribuciones de usuarios (véase el Apartado 7.4.2), utilizando el CA (barras grises) y el PA (barras azules) en dos entornos (U y DU) con despliegues óptimos. Llamamos aquí *despliegue óptimo* en un cierto entorno al que minimiza el número de eNBs para proporcionar *cobertura* radio en cada clutter o entorno, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$. El número óptimo de eNBs, mostrado en la Tabla 7.1, es, respectivamente, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNB (en un entorno DU de área $\mathcal{A}_{DU} = 1 \text{ km}^2$) y $\mathcal{N}_B^{\text{opt,U}} = 9$ eNB (en un entorno U con $\mathcal{A}_U = 6 \text{ km}^2$).

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

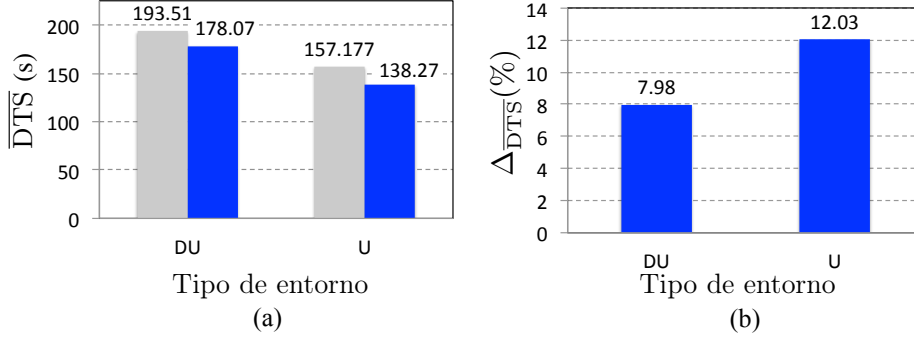


Figura 7.7: (a) Valor medio del Tiempo de Descarga total del Sistema, DTS , \overline{DTS} (s), calculada sobre 10 distribuciones (Sección 7.4.2), para un despliegue óptimo en entornos denso urbano (DU) ($N_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs) y urbano (U) ($N_B^{\text{opt,U}} = 9$ eNBs) –Tabla 7.1–, empleando, respectivamente, el enfoque convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules). (b) $\Delta_{\overline{DTS}}$ (%) o reducción *relativa* de \overline{DTS} que el método propuesto consigue respecto al convencional –Expresión (7.6)– en el despliegue óptimo en entorno DU y U, respectivamente.

Nótese en la Figura 7.7 (a) que, tanto en el entorno denso urbano como en el urbano, el método propuesto (barras grises) consigue mejores resultados (menor \overline{DTS}) que el método convencional basado en CQI. La reducción *relativa* de \overline{DTS} que el método propuesto consigue respecto al convencional, definida como

$$\Delta_{\overline{DTS}}(\%) = \frac{\overline{DTS}_{\text{CA}} - \overline{DTS}_{\text{PA}}}{\overline{DTS}_{\text{CA}}} \cdot 100, \quad (7.6)$$

se ha representado en la Figura 7.7 (b).

En concreto, la Figura 7.7 (b) muestra cómo el método propuesto consigue una reducción relativa (con respecto del convencional) del valor medio de DTS , $\Delta_{\overline{DTS}}$, de $\approx 8\%$ y $\approx 12\%$ en los entornos DU y U (despliegue óptimo de eNBs, Tabla 7.1), respectivamente.

Un punto de vista interesante desde una perspectiva de operador es si la metodología propuesta puede ayudar a mejorar el dimensionado de red. Este es justamente el propósito del siguiente subapartado.

7.4.4 Método propuesto y variación del número de eNBs, \mathcal{N}_B

La cuestión a dilucidar ahora es cómo el parámetro DTS se ve afectado cuando hay una cierta desviación del número de eNBs respecto al óptimo obtenido en la Subsección 7.4.3. En los experimentos siguientes se ha considerado una desviación de $\pm 20\%$ del óptimo $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$, tomando como límites $(1 - 0.2) \cdot \mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}} \equiv \mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$ eNBs (reducción del 20%) y $(1 + 0.2) \cdot \mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}} \equiv \mathcal{N}_B^{\text{H,clu}}$ eNBs (aumento del 20%). Los superíndices “L” y “H” se refieren a los límites inferior y superior, respectivamente. Los resultados para entornos DU y U se muestran, respectivamente, en las Figuras 7.8 y 7.9.

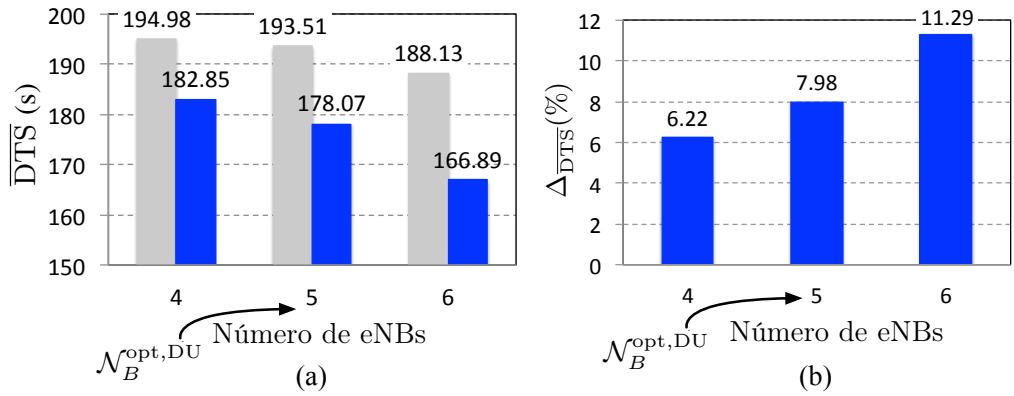


Figura 7.8: (a) $\overline{\text{DTS}}$ (s) en función del número de eNBs, calculado mediante el método convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules) en un entorno DU. (b) Reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$ del método propuesto (con respecto del convencional) –Expresión 7.6–, $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$, en función del número de eNBs en un entorno denso urbano. $\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs es el número óptimo (mínimo) de eNBs para conseguir cobertura.

En particular, la Figura 7.8 (a) representa, para el entorno DU –cuyos valores característicos aparecen en la Tabla 7.1– el *valor medio* de DTS, $\overline{\text{DTS}}$, conseguido por medio del método convencional (barras grises) y el PA (barras azules), en función del número de eNBs desplegados. El número de nodos se encuentra comprendido en un entorno del 20% del valor óptimo. En el entorno denso urbano, este valor óptimo es $\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs. Las variaciones alrededor de éste son $\mathcal{N}_B^{\text{L,clu}} = 4$ eNBs y $\mathcal{N}_B^{\text{H,clu}} = 6$ eNBs.

La Figura 7.8 (b), que representa $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}(\%)$ en función del número de eNBs en el

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

entorno DU, es especialmente interesante, y viene a confirmar, junto con la Figura 7.8 (a), que:

1. El método propuesto asigna usuarios mejor (consigue menor tiempo medio de descarga $\overline{\text{DTS}}$) que el método convencional, no sólo para el despliegue óptimo ($\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs) sino también cuando \mathcal{N}_B varía en $\pm 20\%$ del $\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}}$ eNBs, conduciendo a 4 y 6 eNBs, respectivamente.
2. Incluso en un despliegue subóptimo con $\mathcal{N}_B = 4$ eNBs, el método propuesto consigue una descarga global de todos los usuarios más rápida: $\overline{\text{DTS}}_{\text{PA}} |_{\mathcal{N}_B=4} \approx 182.85 \text{ s} < \overline{\text{DTS}}_{\text{CA}} |_{\mathcal{N}_B=5} \approx 193.5 \text{ s}$. Aunque puede no ser muy claro a simple vista, esto es de gran importancia práctica: el método propuesto permite dimensionar la red usando *menos* nodos (y por lo tanto menos coste) que los que sugiere el método convencional.
3. La simple adición de un (1) nuevo eNB –respecto del valor óptimo de despliegue ($\mathcal{N}_B^{\text{opt,DU}} = 5$ eNBs)– permite al operador conseguir una reducción significativa de $\overline{\text{DTS}}$ de aproximadamente un 11.3%. Esta mejora proporciona al operador una herramienta para discernir si el aumento del número de eNBs consigue una mejora apreciable de la calidad de servicio.

Mientras que la Figura 7.8 se refiere a un entorno DU, la Figura 7.9 explora cómo afecta la desviación del número óptimo de eNBs a $\overline{\text{DTS}}$ y a $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ en un entorno urbano. El experimento revela conclusiones similares a las extraídas en el caso anterior.

Generalizando, en grandes ciudades, donde los entornos U y DU abundan, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El método propuesto exhibe un rendimiento superior al convencional (asigna usuarios a eNBs más eficientemente, consiguiendo un tiempo de descarga global del sistema menor –introduciendo cierta equidad en el reparto de recursos–), no solo para el despliegue óptimo de eNBs en cada entorno, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$, sino también en aquellos despliegues donde el número de eNB \mathcal{N}_B está entre los límites explorados de un $\pm 20\%$: $\mathcal{N}_B^{\text{L,clu}} \leq \mathcal{N}_B \leq \mathcal{N}_B^{\text{H,clu}}$.
2. El método propuesto permite dimensionar la red LTE utilizando $\mathcal{N}_B = \mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$, es decir, un número de eNBs hasta un 20% inferior al que indica al método convencional. Esto permite incurrir en menores costes de inversión), lo que, en un entorno de fuerte competencia y de desaceleración de los beneficios (Capítulo 1), puede resultar de utilidad para los operadores.

3. El método propuesto podría ser una herramienta de valor para decidir si actualizar la red añadiendo más eNBs lleva a una mejora apreciable de la calidad de servicio de los usuarios.

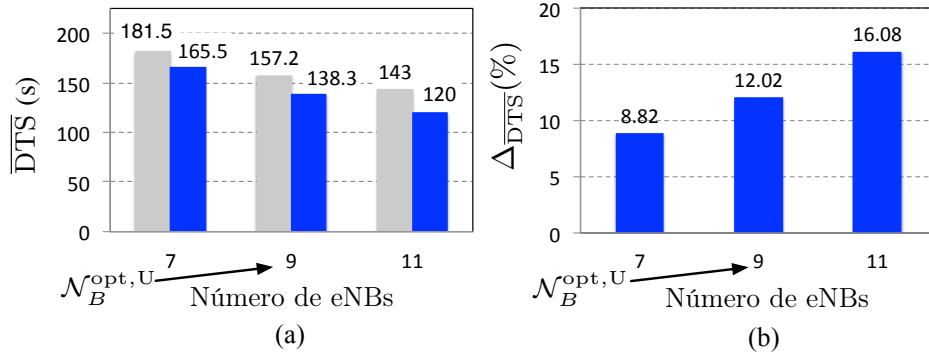


Figura 7.9: (a) \overline{DTS} (s) en función del número de eNBs, calculado mediante el método convencional (barras grises) y el propuesto (barras azules) en un entorno U. (b) Reducción relativa de \overline{DTS} del método propuesto (con respecto del convencional) –Expresión 7.6–, $\Delta_{\overline{DTS}}$ (%), en función del número de eNBs en un entorno denso urbano. $\mathcal{N}_B^{\text{opt},U} = 9$ eNBs es el número óptimo (mínimo) de eNBs para conseguir cobertura.

Para completar este estudio se ha explorado un entorno rural (R) utilizando los datos de la Tabla 7.1, encontrando que el despliegue potencial de un nuevo nodo resulta en una mejora de \overline{DTS} pequeña (cuando se compara con el CA) de $\Delta_{\overline{DTS}} = 1.25\%$. Esto tiene sentido ya que, en áreas rurales, la densidad de usuarios activos es tan pequeña que no hay problemas de sobrecarga, y la capacidad no es un factor limitante. En contraposición, la mejora (o equivalentemente la reducción de \overline{DTS}) es mayor en áreas más pobladas (como las que corresponden a los entornos DU y U) debido a que, en éstos, la asignación es mucho más exigente en términos de capacidad.

Como es de esperar, la adición de nuevos eNBs en entornos urbanos y densos urbanos se traduce en una disminución de \overline{DTS} (s) y, consecuentemente, en una mejora global de la tasa de descarga en DL y de la experiencia de usuario. La cuestión que se plantea es cuánto se reduce \overline{DTS} en términos relativos respecto al despliegue óptimo de eNBs. Para abordar este problema se define la reducción relativa de $\Delta_{\overline{DTS}}$ cuando se aumenta el número de eNBs desde $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a \mathcal{N}_B^H (donde el superíndice H significa mayor (“higher”)

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

que óptimo), como

$$\xi_{\text{DTS}}(\%) \doteq \frac{\Delta_{\overline{\text{DTS}}} |_{\mathcal{N}_B^H} - \Delta_{\overline{\text{DTS}}} |_{\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}}}{\Delta_{\overline{\text{DTS}}} |_{\mathcal{N}_B^H}} \cdot 100, \quad (7.7)$$

donde \mathcal{N}_B^H es un número entero que cumple $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}} < \mathcal{N}_B^H \leq \mathcal{N}_B^{\text{H,clu}}$. Utilizando esta métrica, la Figura 7.10 representa la reducción relativa de $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ cuando aumenta el número de eNBs desde $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a \mathcal{N}_B^H , $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, tanto en entorno denso urbano como en el urbano.

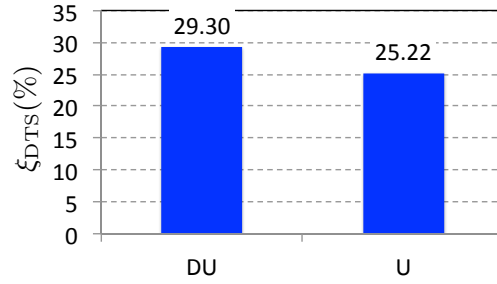


Figura 7.10: Reducción relativa de $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ al aumentar el número de eNBs desde $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a \mathcal{N}_B^H , $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, en función del entorno: denso urbano (DU) y urbano (U). Se corresponde con un posible despliegue de red añadiendo un 20% más de eNBs (con respecto del valor óptimo) en DU ($\mathcal{N}_B^{\text{H,DU}} = 6$) y U ($\mathcal{N}_B^{\text{H,U}} = 11$).

La Figura 7.10 muestra que un aumento del 20% en el número de eNBs (con respecto del mínimo) para ser potencialmente desplegados ($\mathcal{N}_B^{\text{H,DU}} = 6$ and $\mathcal{N}_B^{\text{H,U}} = 11$) resulta en $\xi_{\text{DTS,DU}} = 29.30\% > 25.22\% = \xi_{\text{DTS,U}}$. Es decir, la reducción relativa de $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ cuando aumenta el número de eNBs, $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, es cuantitativamente más importante en medios DU que en U. La causa subyacente es que en un entorno DU, es más probable que un eNB esté sobrecargado debido a la mayor densidad de usuarios activos. La adición de nuevos nodos resulta en una mejora adicional del rendimiento de la red (o equivalentemente, en una reducción del tiempo de descarga para la mayoría de usuarios). Esto tiene sentido debido a que el entorno DU es más demandante (desde el punto de vista de capacidad) que el entorno U.

7.5 Ejemplo sencillo de red ultra-densa

Las Figuras 7.11 (a), (b) y (c) muestran, respectivamente, la asignación de usuarios conseguidas por el modelo basado en CQI, el CQI-LB, y el propuesto.

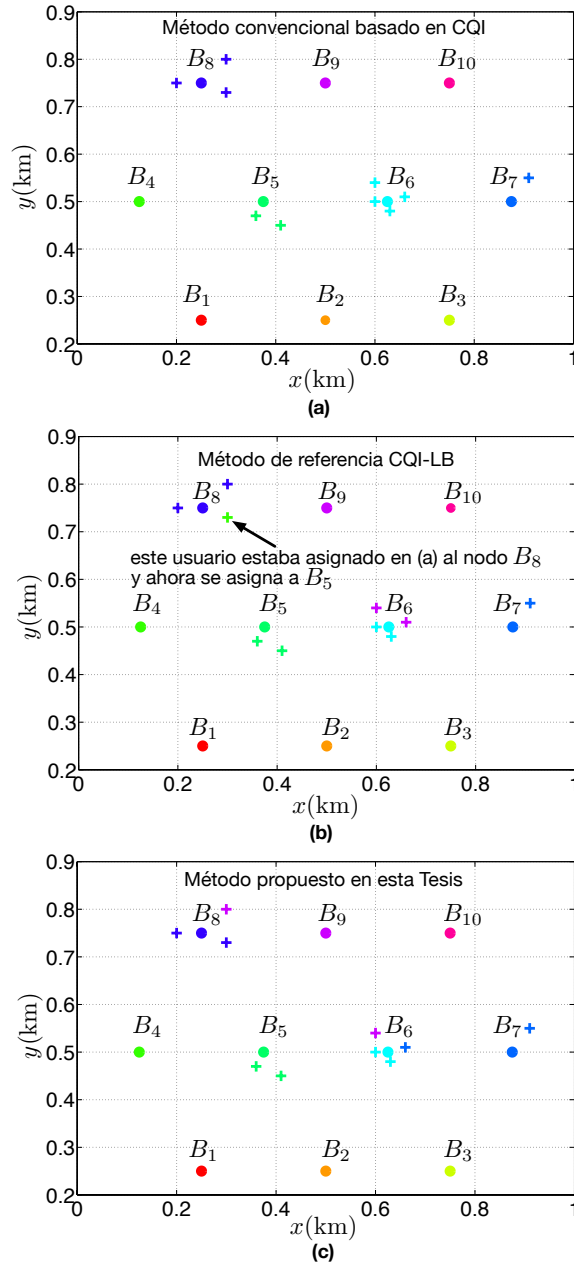


Figura 7.11: Asociación usuario-celda obtenidas mediante el método basado en CQI (a), el método CQI-LB (b) y el propuesto (c).

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

El objetivo de las Figuras 7.11 (a), (b) y (c) es analizar el rendimiento del método propuesto con respecto de los dos métodos convencionales descritos en la Sección 7.1, en escenarios como los que pueden surgir en redes UDNs. Estas se caracterizan por el hecho de que la densidad de usuarios puede ser tan grande como la densidad de nodos, pudiendo estar éstos últimos localizados al azar [75–77]. Al comparar las Figuras 7.11 (a) y (b) se puede ver que, cuando hay más de dos usuarios (cuyas cargas combinadas superen la capacidad máxima del eNB) entonces, el algoritmo LB asocia uno de estos usuarios a otro eNB que está vacío. Esto ocurre con algunos de los usuarios en B_8 , que se asigna a B_5 en Figuras 7.11 (b).

Por último, la Figura 7.12 representa el valor de la métrica DTS(s), el tiempo de descarga total del sistema, calculado utilizando la asociación usuario-celda proporcionada por el modelo basado en CQI, el CQI-LB, y el método propuesto en esta Tesis. En este tipo de red, el método CQI-LB mejora el basado en CQI ya que, como se ha representado en Figura 7.11 (b) descarga al nodo B_8 asignando uno de los usuarios que estaban asignados a B_8 por el método (a) al nodo B_5 . A su vez, el método propuesto mejora (reduce) el tiempo DTS(s) en la Figura 7.12 tanto respecto al método basado en CQI como el del de CQI-LB.

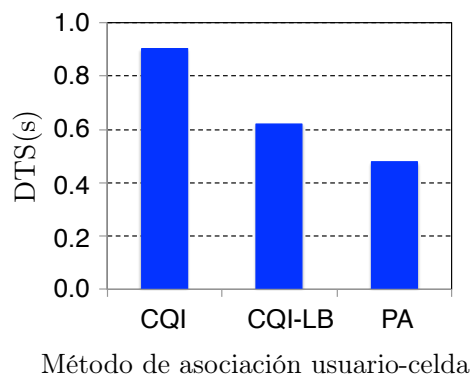


Figura 7.12: DTS (s) calculado usando la asociación usuario-celda proporcionada por el modelo basado en CQI, en LB, y en el enfoque propuesto.

7.6 Resumen y conclusiones

Este capítulo se ha centrado en discutir el trabajo de simulación realizado en esta Tesis para probar hasta qué punto el método de asignación usuario-eNB en LTE propuesto en el Capítulo 5 –y ya dentro del contexto general de dimensionamiento (Capítulos 4 y 6)– funciona mejor que otros métodos convencionales encontrados en la literatura (Capítulo 3).

El capítulo ha comenzado con la implementación de métodos de referencia a efectos comparativos. En la revisión bibliográfica del Capítulo 3 se comprobó que, para realizar la asignación de usuarios a celdas, se consideran básicamente dos *métricas* diferentes –la velocidad instantánea alcanzable en la capa física y la carga de las celdas [86]– que, a su vez, dan lugar a dos grandes grupos de estrategias de asignación: las que, como el método CQI (*Channel Quality Indicator*), están basadas en la calidad de la señal recibida por el usuario (revisados en la Subsección 3.3.1) y las que, en diversas formas, tienen en cuenta el balance de carga –*Load Balancing* (LB)– mediante la transferencia de tráfico (en definitiva, de usuarios) entre celdas (Subsección 3.3.2). A efectos comparativos, en este capítulo, se ha considerado un representante de cada grupo: el método basado en maximizar el CQI de cada usuario y la estrategia CQI-LB. Estos métodos de referencia, junto con el propuesto, se han aplicado, fundamentalmente en entornos urbanos y urbanos densos en redes LTE con un proceso de despliegue convencional y con una densidad de usuarios mucho mayor que la de eNBs (a diferencia de las de tipo HetNet –*Heterogeneous Network*– o UDN –*Ultra Dense Network*–).

El siguiente aspecto se ha centrado en el cálculo de los parámetros del algoritmo evolutivo más adecuados. Nótese que el problema, tal como se ha planteado en el Capítulo 5, consiste en asignar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs en redes LTE mediante la minimización de la nueva métrica DTS (*Download Time of the complete System*), definida en [36] como el tiempo máximo requerido por todos los usuarios del sistema para completar sus descargas. Esta formulación, equivalente a un problema de optimización combinatoria NP-hard, se resuelve de aproximada mediante el algoritmo evolutivo (EA) [36] descrito en el Capítulo 5. Para determinar el *valor de sus parámetros* se ha comenzado realizando un estudio de la *sensibilidad* de éstos en relación a los valores que caracterizan los *entornos urbano y denso urbano*, los más restrictivos en términos de capacidad (por la elevada densidad de usuarios) y complejas características de propagación. El estudio ha concluido que tanto las probabilidades de mutación y cruce como el tamaño y la generación de la población inicial (a partir de una solución sub-óptima basada en CQI) *no* dependen del entorno.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Una vez determinados de forma experimental los valores de los parámetros del algoritmo evolutivo, el capítulo se ha centrado en evaluar hasta qué punto el método propuesto en esta Tesis asigna usuarios a eNBs de forma más eficiente que los métodos de referencia, en entornos urbano y denso urbano en redes LTE con despliegue convencional. Un aspecto conceptual que tienen en común ambos grupos de métodos es que intentan asignar los usuarios a las celdas (ya sea de forma aproximada –método basado en CQI, muy utilizado en la industria– o exacta –en trabajos académicos, con hipótesis que les hacen difícilmente aplicables en situaciones reales–) mediante la maximización de la velocidad o tasa instantánea de usuario. En cambio, nuestra propuesta consiste en la minimización de la nueva métrica DTS mediante un algoritmo evolutivo cuyo coste computacional, que en cualquier caso es menor que la exploración combinatoria, no es un factor limitante, ya que se trata de un algoritmo para ser utilizado en la etapa de *dimensionamiento* y no en la de operación.

El método propuesto consigue $\overline{\text{DTS}}$ (valor medio de DTS) menor que el basado en CQI debido a que éste último asigna primero cualquier usuario al eNB para el cual tiene un CQI mayor, y entonces, con tal asignación, calcula su correspondiente DTS. Esta es una diferencia clave cuando se compara con nuestra propuesta en el que la asignación va dirigida a minimizar DTS y *no* para maximizar el CQI de los usuarios.

El trabajo experimental en diferentes entornos –urbano denso (DU), urbano (U) y rural (R)– en los cuales se dan diferentes condiciones de propagación (causados por diferentes estructuras de las calles, densidad de edificios, características de obstáculos, etc.) y diferentes densidades de usuarios (mucho mayor en zonas urbanas que en rurales) han demostrado que:

1. El método propuesto (formulación basada en minimizar DTS mediante el evolutivo del Capítulo 5) exhibe un rendimiento superior (tanto en entornos urbanos y densidad de usuarios) que los convencionales, no solo para el despliegue óptimo de eNBs (número mínimo para conseguir cobertura) en cada entorno –clutter (CLU)–, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$, sino también para casos en los que el número de eNBs \mathcal{N}_B está en los límites del 20% inferior (L) y superior (H): $\mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$ y $\mathcal{N}_B^{\text{H,clu}}$. El estudio de la reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$ (con respecto al CA), $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ (%) con el número óptimo de eNBs, ha revelado que $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ varía entre $\approx 8\%$ y $\approx 12\%$.
2. El método propuesto en la Tesis permite dimensionar la red LTE, tanto en clutter urbano como en urbano denso, tomando $\mathcal{N}_B = \mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$, es decir, hasta un 20% menos eNBs que el CA. Esto es de gran importancia práctica para los operadores debido a que incurrirían mediante su aplicación en menos costes de inversión y de

operación.

3. Como es de esperar, al añadir nuevos eNBs, en entornos urbanos y densos urbanos, se reduce $\overline{\text{DTS}}(s)$ y, consecuentemente, se mejora la tasa de descarga en DL y la experiencia de usuario. $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ se reduce hasta un 16%. En este sentido el método de asociación usuario-eNB defendido en la Tesis podría ser una herramienta valiosa para decidir si ampliar la red añadiendo nuevos eNBs ayuda a mejorar la calidad de servicio de forma apreciable para el usuario medio. Recuérdese que nuestro método permite introducir cierta equidad en el reparto de recursos, al no premiar siempre (con mayores velocidades) a los usuarios privilegiados con mejores CQIs. La razón es que busca minimizar el parámetro DTS o tiempo máximo requerido por *todos* los usuarios del sistema para completar sus descargas. Por eso se consigue un reparto más equitativo de los recursos y, en promedio, la mayor parte de los usuarios mejora (reduce) su tiempo de descarga.
4. El despliegue potencial de un nuevo eNB en un entorno rural produce una reducción mínima de $\overline{\text{DTS}}$, $\Delta_{\overline{\text{DTS}}} \approx 1.25\%$. Esto se debe a que en áreas rurales la densidad de usuarios activos es tan pequeña que no hay problemas de sobrecarga y la capacidad no es el factor limitante.
5. El estudio de la reducción relativa $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ cuando se aumenta el número de eNBs desde el óptimo $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a $\mathcal{N}_B^{\text{H,CLU}}$, $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, tanto en entornos densos como urbanos, ha revelado que es cuantitativamente más importante en medios DU que en U: $\xi_{\text{DTS,DU}} \approx 29\% > 25\% \approx \xi_{\text{DTS,U}}$. La causa subyacente es que, en clutters DUs, es más común que un eNB se sobrecargue debido a la mayor densidad de usuarios activos. La adición de nuevos nodos resulta en una mejora adicional del rendimiento de la red (o de manera equivalente, en una reducción del tiempo de descarga para la *mayoría* de usuarios). Esto tiene sentido porque los entornos urbanos densos son más exigentes en términos de capacidad que los urbanos.

Aunque no están dentro del objetivo específico de esta Tesis, centrada en redes LTE en despliegues convencionales, este Capítulo ha concluido con un breve trabajo experimental en redes de pequeña escala ultra-densas, caracterizadas por un número similar de usuarios y nodos. Este estudio tentativo ha sugerido también las propiedades beneficiosas de nuestra aproximación, con mejores rendimientos que las asignaciones proporcionadas por los métodos basados en CQI y LB.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Todas estas conclusiones parecen apuntar a que el método de asignación usuario-eNB, incluido en la herramienta global de dimensionamiento implementada, puede ser útil en la situación actual de los operadores. La razón se encuentra en que éstos necesitan *redefinir su modelo* de negocio para hacerlo sostenible en el tiempo debido a que se está produciendo una ralentización del crecimiento de los ingresos. Una de las causas se encuentra en que la demanda de servicios de comunicación basados en IP, como WhatsApp, Facebook Messenger o Skype, se están haciendo enormemente populares y, de hecho se espera que ganen aún mayor importancia. Sin embargo, los servicios *over-the-top* reportan muy pocos beneficios a los operadores móviles. Esta es precisamente una de las razones por las que los operadores tienen que encontrar un nuevo modelo de negocio que permita integrar tales servicios y aumentar sus beneficios. Esto es aún más importante en un contexto en el cual, por un lado, los operadores necesitan financiación para el despliegue de nuevas redes LTE mientras que, por otro, sus servicios convencionales están bajo fuerte presión. Estos fenómenos, junto con problemas de regulación y de fuerte competencia, está produciendo una ralentización del crecimiento de los ingresos. En este contexto, teniendo en cuenta la necesidad de los operadores de aumentar sus márgenes de beneficio (optimizar la inversión mientras que mantiene o incluso aumenta la calidad de servicio), el método propuesto puede ser (1) una herramienta de dimensionamiento útil para (2) ayudar a tomar mejores decisiones en el dimensionamiento *rentable* de la red, ya que, para unas determinadas condiciones, (3) nuestro método conduce a un *menor* número de eNB (menor coste) que mediante los otros enfoques, y (4) mejorar la actualización de la red (mediante el despliegue de nuevos eNB) para cumplir con la siempre creciente demanda de tráfico.

Parte III

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

Capítulo 8

Resumen y conclusiones

8.1 Resumen

En esta Tesis Doctoral se ha implementado una herramienta software que aporta contribuciones novedosas a la *planificación sistémica* de redes LTE (*Long Term Evolution*), centrada en el proceso de dimensionado (multi-servicio y multi-usuario), que incluye una nueva formulación del problema de asignación usuario-eNB (*Evolved Node B*) mediante un algoritmo evolutivo, EA (*Evolutionary Algorithm*) [36]. La Tesis tiene posibles *aplicaciones* (\mathbf{A}_i) tanto en el ámbito industrial como en el académico e investigador [36]:

\mathbf{A}_1 Por un lado, en lo que respecta a su potencial aplicación en la *industria* de las comunicaciones móviles, la necesidad *práctica* de esta herramienta es especialmente relevante en un contexto en el que se está produciendo una ralentización del crecimiento de los ingresos de los operadores [1]. Una de las causas se encuentra en que la demanda de servicios de comunicación basados en IP, como WhatsApp, Facebook Messenger o Skype, está creciendo fuertemente, pero reportan muy pocos beneficios a los operadores móviles. Ésta es precisamente una de las razones por las que los operadores tienen que encontrar un nuevo modelo de negocio que permita integrar tales servicios y aumentar sus beneficios. Esto es aún más acuciante en un contexto en el cual, por un lado, los operadores necesitan financiación para el despliegue (o mejora) de nuevas redes LTE mientras que, por otro, sus servicios convencionales están bajo fuerte presión. Estos fenómenos, junto con problemas de regulación y de fuerte competencia, están generando la desaceleración de beneficios mencionada.

La necesidad de financiación para realizar nuevos despliegues se comprende mejor

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

si se consideran algunas cifras que ilustran la relevancia técnica y económica de LTE, el estándar móvil con el crecimiento más rápido de toda la historia. Su vertiginosa expansión se debe a la conjunción de muy variados factores [1]. Uno de los más importantes es el rápido crecimiento del mercado de dispositivos móviles, con un crecimiento anual de aproximadamente un 80% durante 2016, siendo los *smartphones* los dispositivos preferidos por los usuarios (aproximadamente el 75% de los vendidos en 2016). Otro factor es el veloz despliegue de las propias redes, existiendo en todo el mundo 449 redes LTE comerciales en 157 países [1]. También influyen *comportamientos* nuevos, especialmente los correspondientes a los adolescentes, que están cambiando las pautas de visualización de TV/vídeo, pasando desde el televisor convencional a los smartphones [1]. Todos estos factores combinados están impulsando una *creciente demanda* de nuevos servicios con fuertes requisitos de ancho de banda (tales como TV, vídeo bajo demanda o juegos). En concreto, el tráfico de datos ha crecido un 75% durante el último año [1]. Así, dentro de este contexto adverso, y con el objetivo de conseguir márgenes de beneficios razonables, los operadores tienen como objetivo la optimización de las inversiones, preservando la calidad de servicio QoS (*Quality of Service*), a través de una estrategia doble: (1) la selección de la mejor tecnología disponible, y (2) la optimización del despliegue de los equipos de red. En particular, la optimización de la Red de Acceso Radio RAN (*Radio Access Network*) –el sub-sistema de eNBs en LTE– es crucial, ya que representa aproximadamente un 60% de la inversión total, e incluso, un porcentaje más elevado del coste OPEX (*Operating Expense*) [17, 18]. Una forma de mitigar estos efectos es realizar una *planificación más eficiente*. Esta es pues una de las motivaciones de esta Tesis, con posible aplicación en la industria.

- A₂** Por otro lado, además de la potencial utilidad para los operadores móviles, esta Tesis también tiene una motivación *científica*. Se fundamenta ésta en la necesidad de nuevos modelos y algoritmos que permitan una mejor planificación mediante una asignación de usuarios a eNBs más eficiente que la que se consigue con los modelos y técnicas actuales. Las contribuciones novedosas en este tema de investigación, publicadas en [36], son: 1) una nueva formulación del problema basada en la asignación usuario-eNB mediante la minimización de la nueva métrica o función de coste DTS (*Download Time of the complete System*), definida como el tiempo mínimo requerido por todos los usuarios activos en el sistema para completar sus correspondientes descargas; y 2) la solución aproximada del problema

mediante un algoritmo evolutivo EA, con codificación, población inicial y operadores adaptados a la nueva formulación del problema de asociación usuario-celda UCAP (*User-Cell Association Problem*).

Precisamente, los Capítulos 1 y 2 se han centrado en:

1. *Describir* la *situación actual* de LTE, que comparte el acceso móvil con otras tecnologías como HSPA (*High Speed Packet Access*) o EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) y GSM (*Global System for Mobile Communications*) como redes de respaldo.
2. *Motivar* la necesidad de los trabajos desarrollados en esta Tesis.
3. *Introducir* aquellos aspectos técnicos más relevantes de LTE que se emplean a lo largo de la Tesis.

Con estas motivaciones y aplicaciones en mente, una parte considerable de los trabajos tendentes a la consecución de esta Tesis se ha centrado en realizar una revisión del estado del arte, resumida en el Capítulo 3, con el doble objetivo de posicionar la Tesis y comprobar hasta qué punto es novedosa. En resumen:

1. En el análisis de la bibliografía sobre el dimensionamiento de la red LTE se ha concluido que, si bien, desde el punto de vista de estudio de cobertura, los modelos estudiados suelen emplear básicamente la misma metodología, para el estudio de la capacidad suelen emplear, en general, técnicas distintas que demandan una parametrización compleja y demasiado prolija. Tanto las herramientas software comerciales (que requieren licencias costosas) como las de software libre presentan básicamente dos tipos de problemas: tienen una parametrización compleja y no son lo suficientemente flexibles para realizar ciertas tareas de investigación. Esta es otra de las razones que ha motivado el desarrollo de la herramienta propuesta en esta Tesis.
2. En lo que respecta a la revisión bibliográfica del problema de la asociación de usuarios a celdas, en general, puede concluirse que este problema se aborda desde dos extremos muy distintos, existiendo entre ambos una laguna que la propuesta de esta Tesis ha demostrado poder cubrir. En un extremo, los operadores móviles utilizan enfoques convencionales *sub-óptimos* –basados en SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) o bien en LB (*Load Balancing*). En el otro extremo se

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

encuentran las investigaciones académicas, que suelen centrarse en *modelos óptimos* pero empleando hipótesis *poco realistas* o muy difíciles de llevar a la práctica (por ejemplo, redes muy pequeñas), *lo que impide su utilización por parte de los operadores*. Ese gap intermedio –entre soluciones exactas en redes muy pequeñas (en un extremo) y métodos convencionales aproximados en redes reales (en el enfoque de los operadores)– es precisamente el que esta Tesis ha resuelto, al proponer un nuevo modelo de asignación cuya resolución mediante un algoritmo evolutivo proporciona mejores resultados que los métodos convencionales en redes reales [36]. Sí que se ha comprobado que hay aproximaciones *similares* (aunque diferentes en concepto) [76, 84, 91, 115, 120, 121] dentro del campo genérico de aplicación de las redes móviles. La propuesta investigada en esta tesis difiere de [76, 86, 90, 91, 121, 170] en el hecho de que éstas *transforman* el problema original, que es intratable computacionalmente, en otro que se puede resolver de forma exacta con un coste computacional menor (pero aún extremadamente elevado), pero sólo en redes muy pequeñas. Finalmente, nuestro método difiere de [91], el más similar en concepto, en que: 1) La formulación combinatoria es diferente; 2) Nuestra formulación basada en la novedosa métrica DTS incluye todos los aspectos técnicos de LTE; 3) Nuestra propuesta [36] resuelve el problema de una forma aproximada mediante la aplicación de un EA en *redes de tamaños realistas* (con densidades de usuarios que pueden ser del orden de varios centenares de usuarios por km²), mientras que la propuesta [91] obtiene una solución exacta mediante evaluación combinatoria de una aproximación lineal del problema en una *red extremadamente pequeña*.

3. Finalmente, se ha comprobado que hay algunos trabajos que han aplicado técnicas evolutivas a problema de asignación de recursos en redes LTE, aunque con diferentes enfoques del que se propone en esta tesis. La mayoría de ellos tratan problemas en el enlace descendente [153–159]. De entre ellos, hay algunos trabajos de investigación que buscan optimizar el mecanismo de scheduling que asigna recursos a los usuarios *una vez que ya están en el eNB*, pero, hasta donde sabemos, no hay ningún trabajo que resuelva el problema de asignación de usuarios a LTE minimizando el tiempo total de descarga y utilizando una codificación como la que nosotros hemos propuesto en [36].

En conclusión, la revisión bibliográfica efectuada en esta Tesis sugiere que: 1) *No hay ningún trabajo* que aborde el problema de la asignación de usuarios a eNB con el objetivo de minimizar el tiempo total de descarga del sistema mediante un EA en el

ámbito específico de LTE; y 2) Se necesita una herramienta software de planificación estratégica de red LTE, que exhiba una parametrización más sencilla (que las herramientas existentes), y que sea lo suficientemente flexible para: 2.1) Calcular el número de eNB necesarios para dar cobertura a un área geográfica, en un entorno multiservicio y multiusuario; 2.2) Analizar el rendimiento en distintos tipos de entornos (Urbano Denso, Urbano, Sub-urbano y Rural) y con diferentes técnicas de scheduling; 2.3) Calcular la velocidad media de los servicios ofertados teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios y comprobar si se cumple o no el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios implantados, añadiendo, en caso necesario, eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

Ya con una perspectiva clara de los trabajos relacionados, en el Capítulo 4 se ha formulado, de forma más detallada, el objetivo *general* de diseñar una herramienta software para la *planificación sistémica* de redes LTE, centrada en el proceso de dimensionado de red en un entorno multiusuario y multiservicio. Esta herramienta debe ser especialmente flexible, permitiendo la integración en la misma de módulos con diferentes técnicas de scheduling y mecanismos de asignación de usuarios a eNBs. Así, los *objetivos específicos* (O_i) perseguidos para ello han sido:

- O_1) Dimensionar una red LTE en un entorno multi-servicio y multi-usuario
- O_2) Incluir una nueva formulación y solución del problema de asignación de usuarios a eNBs en LTE
- O_3) Simular y analizar el comportamiento del completo del sistema.

Con esos objetivos, las *contribuciones* (C_i) novedosas han sido

- C_1) La *implementación* de una herramienta de planificación sistémica de redes LTE, centrada en el proceso de dimensionado de red en un entorno multiusuario y multiservicio.
- C_2) El desarrollo de un nuevo modelo para la asociación usuario-celda en LTE que se basa en la minimización de una nueva métrica relacionada con el tiempo mínimo requerido por *todos* los usuarios del sistema para completar sus respectivas descargas
- C_3) La solución de éste mediante un algoritmo evolutivo.

A este respecto, el Capítulo 5 se centra en describir el nuevo método para asociar \mathcal{N}_U usuarios a \mathcal{N}_B eNBs en redes LTE. La propuesta tiene, como se ha mencionado,

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

una doble contribución, en lo que respecta al planteamiento del problema (C_2), por un lado, y al algoritmo evolutivo para resolverlo (C_3), por otro.

En concreto, se ha propuesto un nuevo modelo que asigna usuarios a eNBs minimizando la nueva métrica DTS concebida como el tiempo mínimo requerido por todos los usuarios activos en el sistema para completar sus correspondientes descargas. El problema de la asociación usuario-celda es, en general, un problema combinatorio de tipo NP hard. Aunque se ha visto que hay algunos trabajos parcialmente relacionados, que abordan esta complejidad *transformando el problema* en otro cuya solución *óptima* es menos difícil de obtener (aunque aún con un gran coste computacional, y no aplicable a redes “grandes” comerciales), la novedad de nuestro planteamiento estriba en solucionar el problema combinatorio (*directamente*, sin transformarlo) *de forma aproximada* mediante la minimización de la nueva métrica DTS.

Y es ahí dónde surge la segunda contribución: realizar la asignación cuasi-óptima, aproximada, minimizando la función de coste DTS *mediante un algoritmo evolutivo* adaptado al problema. Su coste computacional, que en cualquier caso es menor que la exploración combinatoria (intratable computacionalmente en redes comerciales), *no* es un factor limitante porque es un algoritmo *off-line* destinado a ser utilizado durante la etapa de *dimensionado* y en ningún caso durante la fase de operación.

La propuesta centrada en la minimización de DTS (en vez de en la maximización de tasas de usuarios individuales, como se hace en muchos de los trabajos), se traduce en la asignación de usuarios desde unos eNBs que, de lo contrario estarían sobrecargados (cuando se utilizan otros enfoques convencionales, tales como el basado en CQI), a otros con menos carga. Esto tiene un *doble beneficio* tanto para el operador como para los usuarios. Por un lado ayuda al operador a utilizar sus recursos de una manera más equilibrada y rentable. Por otro, la estrategia propuesta reduce el tiempo de descarga (aumentando la velocidad) para *la mayoría* de los usuarios. En este sentido, introduce cierta equidad en el reparto de recursos y ayuda a una mejora de la calidad de servicio para la mayoría de los usuarios.

Y como sucede con otras propuestas como [76, 86, 90, 91, 121, 170], nuestro planteamiento de asociar usuarios a eNBs es un problema combinatorio muy complejo. Nótese que la función DTS es una función con un número largo de variables discretas y muchos mínimos locales, que no es fácil de minimizar. Su formulación combinatoria, aunque diferente de otras similares, es también NP hard. Ésta es precisamente la razón que ha motivado la segunda contribución de nuestro trabajo, que consiste en abordar el problema de minimización de DTS mediante el uso de una implementación particular de un EA.

Un aspecto interesante del EA propuesto para el UCAP en LTE es la forma en la que se realiza la codificación de las soluciones (asignaciones usuario-celda) candidatas. El cromosoma es un vector de dimensión \mathcal{N}_U en el que cada elemento representa un usuario. El elemento en la posición j contiene cierta información sobre el usuario u_j . Esa información es un número entero que representa a qué eNB de los \mathcal{N}_U disponibles se ha asignado dicho usuario. Los operadores de mutación, cruce y selección se han diseñado para que puedan trabajar con esta codificación. El operador de cruce, en particular, es un torneo de todos contra todos. El otro aspecto novedoso de la implementación del algoritmo evolutivo propuesto se encuentra en la población inicial. Como se tiene información de una solución sub-óptima del problema (la proporcionada por el método convencional basado en CQI (*Channel Quality Indicator*) –que asigna un usuario al eNB para el cual tiene mejor CQI–), se incluye ésta en la población inicial, y el resto de los individuos se genera, básicamente, aplicando los operadores de mutación y cruce sobre esa solución. En cualquier caso, la solución encontrada (asociación de cada usuario a un eNB) es mejor (menor DTS) que la asignación realizada con métodos convencionales (CQI y CQI-LB).

Este algoritmo se ha incluido dentro de la herramienta global de planificación. Precisamente, en el Capítulo 6 se han resumido los aspectos fundamentales de la herramienta de simulación para planificación LTE que se ha implementado. La herramienta está diseñada para su utilización en el proceso de *dimensionamiento* de la red, es decir, en la *primera fase* de la planificación celular, orientándose principalmente al estudio de la *cobertura y capacidad* del sistema.

De forma resumida, esta herramienta tiene (1) una parametrización sencilla y eficaz de los múltiples parámetros de entrada y de la ubicación inicial de los eNB, que (2) permite simular un entorno multi-servicio y multi-usuario, empleando (3) diferentes algoritmos de asociación usuario-eNB y (4) varios algoritmos de scheduling, de forma que (5) se garantiza el cumplimiento del requisito de Velocidad de Descarga Mínima de cada servicio.

Para cumplir los requisitos (1)–(5), la herramienta calcula la velocidad media de los servicios ofertados, teniendo en cuenta los tiempos de descarga de cada uno de los usuarios. Si con el número de eNB, calculados previamente, se cumple el requisito de velocidad demandada por los distintos servicios simulados, entonces se dará por válido dicho valor. En caso de incumplimiento, se añaden eNBs de forma iterativa hasta cumplir el requisito anterior.

8.2 Conclusiones

Conceptualmente, la Tesis doctoral desarrollada se puede interpretar como la conjunción de dos partes diferentes pero altamente interrelacionadas. Una de ellas consiste en el desarrollo de un algoritmo evolutivo para la asignación de terminales a eNBs. La otra consiste en el desarrollo de una herramienta de planificación de la red de acceso LTE, bajo criterios estratégicos, mediante la cual se demuestra la eficiencia del algoritmo genético propuesto respecto a métodos de asignación convencionales.

En lo que respecta a la herramienta de planificación estratégica centrada en el dimensionado de redes LTE en entornos multi-servicio y multi-usuario, las principales conclusiones obtenidas han sido:

1. Es necesario hacer especial énfasis, a la hora de diseñar la herramienta, en la introducción de parámetros de entrada. La causa se encuentra en permite cargar fácilmente un “escenario”, que no es más que el conjunto de todos los datos sobre: (1) el *entorno* o clutter en el que se quiere realizar la simulación (Rural, Urbano, Suburbano o Denso); (2) las *características* de la red LTE; y (3) las propiedades de los *servicios* demandados.

Con todos los datos de entrada, la herramienta permite:

2. Generar la posición aleatoria de los usuarios multi-servicio.
3. Obtener la distribución de los eNBs (que puede introducirse directamente como dato de entrada, o bien determinarse gracias a la herramienta, mediante el cálculo del enlace radio).
4. Calcular las matrices de SINR y de CQI de los usuarios.
5. Resolver el problema de la asociación usuario-eNB mediante tres métodos (el convencional basado en CQI, el método CQI-LB, y el propuesto en el Capítulo 5).
6. Utilizar diferentes schedulers.
7. Mostrar los resultados:
 - Asociación usuario-eNB.
 - Throughput (bit/s) en función del tiempo ($ms = TTI$) en cada eNB.
 - Tiempo de descarga de cada usuario ordenado por CQI y por servicio prestado.

- Régimen binario medio por servicio.

Utilizando esta herramienta, y para poder comprobar hasta qué punto es útil el método de asociación usuario-eNB investigado en esta Tesis, el Capítulo 7 se ha centrado en probar experimentalmente su eficiencia. Para ver si exhibe o no alguna ventaja frente a los métodos convencionales, se ha implementado un representante de cada grupo de métodos de asociación usuario-celda encontrado en la literatura: 1) el método basado en maximizar CQI (*Channel Quality Indicator*) –perteneciente al conjunto de estrategias basadas en maximizar la velocidad instantánea alcanzable en la capa física– y el método CQI-LB (*Load Balancing*) –mediante la transferencia de tráfico (en definitiva, de usuarios) entre celdas–. Estos métodos de referencia, junto con el propuesto, se han aplicado, fundamentalmente, en entornos urbanos y urbanos densos en redes LTE con un proceso de despliegue convencional y con una densidad de usuarios mucho mayor que la de eNBs (a diferencia de las de tipo HetNet –*Heterogeneous Network*– o UDN –*Ultra Dense Network*–). El trabajo de simulación realizado en diferentes entornos –urbano denso (DU), urbano (U) y rural (R)–, en los cuales se dan diferentes condiciones de propagación (causados por diferentes estructuras de las calles, densidad de edificios, características de obstáculos, etc.) y diferentes densidades de usuarios (mucho mayor en zonas urbanas que en rurales), ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Es necesario calcular el valor óptimo de los *parámetros* del algoritmo evolutivo. Para ellos se ha realizado un estudio de la *sensibilidad* de éstos en relación a los valores que caracterizan los *entornos urbano y denso urbano*, los más restrictivos en términos de capacidad (por la elevada densidad de usuarios) y complejas características de propagación. El estudio ha concluido que tanto las probabilidades de mutación y cruce como el tamaño y la generación de la población inicial (a partir de una solución sub-óptima basada en CQI) *no* dependen del entorno.

Una vez determinados de forma experimental los valores de los parámetros del algoritmo evolutivo, se ha evaluado hasta qué punto el método propuesto en esta Tesis asigna usuarios a eNBs de forma más eficiente que los métodos de referencia, en entornos urbano y denso urbano en redes LTE con despliegue convencional.

2. En este aspecto, un elemento conceptual que tienen en común ambos grupos de métodos es que intentan asignar los usuarios a las celdas (ya sea de forma aproximada –método basado en CQI, muy utilizado en la industria– o exacta –en trabajos académicos, con hipótesis que les hacen difícilmente aplicables en situaciones reales–) mediante la maximización de la velocidad o tasa instantánea

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

de usuario. En cambio, la propuesta investigada en esta Tesis consiste en la minimización de la nueva métrica DTS mediante un algoritmo evolutivo cuyo coste computacional (que en cualquier caso es menor que la exploración combinatoria) no es un factor limitante, ya que se trata de un algoritmo para ser utilizado en la etapa de *dimensionamiento* y no en la de operación.

3. El método propuesto consigue $\overline{\text{DTS}}$ (valor medio de DTS) menor que el basado en CQI debido a que éste último asigna primero cualquier usuario al eNB para el cual tiene un CQI mayor, y entonces, con tal asignación, calcula su correspondiente DTS. Ésta es una diferencia clave cuando se compara con nuestra propuesta en el que la asignación va dirigida a minimizar DTS y *no* para maximizar el CQI de los usuarios.
4. El método propuesto (formulación basada en minimizar DTS mediante el evolutivo del Capítulo 5) exhibe un rendimiento superior (tanto en entornos urbanos y densidad de usuarios) que los convencionales, no solo para el despliegue *óptimo* de eNBs (número mínimo para conseguir cobertura) en cada entorno –clutter (CLU)–, $\mathcal{N}_B^{\text{opt,clu}}$, sino también para casos en los que el número de eNBs \mathcal{N}_B está comprendido entre los límites del 20% inferior y superior, $\mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$ y $\mathcal{N}_B^{\text{H,clu}}$, respectivamente. El estudio de la reducción relativa de $\overline{\text{DTS}}$ (con respecto al método CQI), $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ (%), con el número óptimo de eNBs, ha revelado que $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ varía entre ≈ 8 % y ≈ 12 %.
5. El método propuesto en la Tesis permite dimensionar la red LTE, tanto en clutter urbano como en urbano denso, empleando un número de eNBs menor que el que se obtiene cuando se aplica el método convencional basado en maximizar CQI. En concreto, se ha comprobado que el número de eNBs puede ser $\mathcal{N}_B = \mathcal{N}_B^{\text{L,clu}}$, es decir, hasta un 20% menor que con el método CQI. Esto es de gran importancia práctica para los operadores debido a que permite disminuir tanto los costes de inversión como los de operación.
6. El método de asociación usuario-eNB investigado podría ser una herramienta valiosa para decidir si ampliar la red añadiendo nuevos eNBs ayuda a mejorar la calidad de servicio de forma apreciable para el usuario medio. Recuérdese que nuestro método permite introducir cierta equidad en el reparto de recursos, al no premiar siempre (con mayores velocidades) a los usuarios privilegiados con mejores CQIs. La razón es que busca minimizar el parámetro DTS o tiempo máximo requerido por *todos* los usuarios del sistema para completar sus descargas. Por eso

se consigue un reparto más equitativo de los recursos y, en promedio, la mayor parte de los usuarios mejora (reduce) su tiempo de descarga. En concreto, se ha comprobado que al añadir nuevos eNBs, en entornos urbanos y densos urbanos, se reduce $\overline{\text{DTS}}(\text{s})$ y, consecuentemente, se mejora la tasa de descarga en DL y la experiencia de usuario. $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ se reduce hasta un 16%. En cambio, el despliegue potencial de un nuevo eNB en un entorno rural produce una reducción mínima de $\overline{\text{DTS}}$, $\Delta_{\overline{\text{DTS}}} \approx 1.25\%$. Esto se debe a que en áreas rurales la densidad de usuarios activos es tan pequeña que no hay problemas de sobrecarga y la capacidad no es el factor limitante.

7. El estudio de la reducción relativa $\Delta_{\overline{\text{DTS}}}$ cuando se aumenta el número de eNBs desde el óptimo $\mathcal{N}_B^{\text{OPT}}$ a $\mathcal{N}_B^{\text{H,CLU}}$, $\xi_{\text{DTS}}(\%)$, tanto en entornos densos como urbanos, ha revelado que es cuantitativamente más importante en medios DU que en U: $\xi_{\text{DTS,DU}} \approx 29\% > 25\% \approx \xi_{\text{DTS,U}}$. La causa subyacente es que, en clutters DUs, es más común que un eNB se sobrecargue debido a la mayor densidad de usuarios activos. La adición de nuevos nodos resulta en una mejora adicional del rendimiento de la red (o de manera equivalente, en una reducción del tiempo de descarga para la *mayoría* de usuarios). Esto tiene sentido porque los entornos urbanos densos son más exigentes en términos de capacidad que los urbanos.
8. Aunque no están dentro del objetivo específico de esta Tesis, centrada en redes LTE en despliegues convencionales, la parte experimental de la Tesis ha concluido con un breve trabajo de simulación en redes de pequeña escala ultra-densas, caracterizadas por un número similar de usuarios y nodos. Este estudio tentativo ha sugerido también las propiedades beneficiosas de nuestra aproximación, con mejores rendimientos que las asignaciones proporcionadas por los métodos basados en CQI y LB.
9. El método de asignación usuario-eNB, incluido en la herramienta global de dimensionamiento implementada, puede ser útil en la situación actual de los operadores. La razón se encuentra en que éstos necesitan *redefinir su modelo* de negocio para hacerlo sostenible en el tiempo debido a que se está produciendo, como se ha mencionado, una ralentización del crecimiento de los ingresos.
10. En este contexto, teniendo en cuenta la necesidad de los operadores de aumentar sus márgenes de beneficio (optimizar la inversión mientras que mantiene o incluso aumenta la calidad de servicio), el método propuesto puede ser (1) una herramienta de dimensionamiento útil para (2) ayudar a tomar mejores decisiones en

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

el dimensionamiento *rentable* de la red, ya que, para unas determinadas condiciones, (3) nuestro método conduce a un *menor* número de eNB (menor coste) que mediante los otros enfoques, y (4) permite mejorar la actualización de la red (mediante el despliegue de nuevos eNB) para cumplir con la siempre creciente demanda de tráfico.

8.3 Líneas de trabajo futuras

Al igual que el trabajo desarrollado se puede ver como dos partes conceptualmente distintas pero interdependientes, las potenciales líneas futuras de trabajo también se pueden conceptualizar en dos campos: el asociado a tecnología LTE y su modelado y el de las herramientas para planificación estratégica de la red.

8.3.1 Línea de trabajo de modelado y simulación

1. En el diseño inicial del simulador se ha considerado el empleo de una sola antena entre eNB y UE. LTE se diseñó de forma que el eNB y el equipo de usuario pudieran usar antenas múltiples tanto para transmisión como para recepción. Una de las técnicas de antenas múltiple implementadas en LTE es multiplexación espacial, en la cual tanto transmisor como receptor emplean varias antenas, de forma que se establecen varios canales paralelos con el objetivo de aumentar el régimen binario y sin que haya que aumentar el ancho de banda del sistema. Partiendo de la situación inicial ya implementada de una antena única para eNB y UE, la primera línea de investigación consiste en desarrollar un módulo que posibilite el empleo de multiplexación espacial de forma que sea posible seleccionar el número de antenas en eNB y UE.
2. En las simulaciones realizadas se han considerado han considerado usuarios activos estáticos, es decir, son usuarios que no se mueven mientras realizan sus correspondientes descargas. Por este motivo se puede estudiar la ampliación de la herramienta de simulación para considerar otro tipo de entornos en los que se considere el movimiento de los usuarios, bien andando o en vehículos, como simulan los modelos estandarizados y empleados en LTE: EPA (*Extended Pedestrian A*), EVA (*Extended Vehicular A*) y ETU (*Extended Typical Urban*).
3. La tecnología de acceso empleada ha sido LTE exclusivamente. En la actualidad está emergiendo LTE-Advanced (LTE-A), debido principalmente a su compatibilidad con LTE y las mejoras introducidas basadas en agregación de portadoras,

técnicas de antenas múltiples, eficiencia espectral y latencias. Esta evolución continúa en la actualidad por lo que una nueva línea de investigación a seguir es el desarrollo de un módulo específico que desarrolle LTE-A y se integre en la herramienta de simulación, permitiendo comparativas en cuanto a DTS y coste de despliegue entre las dos tecnologías de acceso.

8.3.2 Campo de herramientas de planificación estratégica de red

En el campo de las herramientas de planificación estratégica de red LTE, una línea futura de investigación es el diseño, desarrollo e implementación de un algoritmo iterativo de cálculo de radio celular tomando como dato de entrada una capacidad mínima garantizada en términos de régimen binario mínimo para un usuario o de DTS. Este algoritmo se integraría en la herramienta de simulación ya desarrollada de forma que en el dimensionado de red se tenga en cuenta no solo el radio celular calculado en base a cobertura sino también en base a capacidad seleccionando el más limitante.

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Bibliografía

- [1] Ericsson. Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. Technical Report 11, Ericsson, SE-126 25 Stockholm, Sweden, 11 2016. <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>. 3, 4, 5, 161, 162
- [2] Ericsson. Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. Technical Report 1, Ericsson, SE-126 25 Stockholm, Sweden, 11 2015. <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-june-2015.pdf>. 4
- [3] GSA. “GSM/3G Stats. Fast Facts. Q1 2015 mobile subscriptions”. Technical report, GSA (the Global mobile Suppliers Association), 2015. Available on <http://www.gsacom.com/news/statistics>, 2015. Information Paper available on <http://www.gsacom.com/>. 3
- [4] GSMA. The Mobile Economy 2015. Technical Paper available on <http://www.gsmamobileeconomy.com/>, 2016. 3
- [5] Jyrki TJ Penttinen. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons, 2015. 3
- [6] Wonsuk Jung and Youngsun Kwon. Differences between LTE and 3G service customers: Business and policy implications. *Telematics and Informatics*, 32(4):667–680, 2015. 3
- [7] Sasan Adibi, Amin Mobasher, and Tom Tofigh. LTE networking: extending the reach for sensors in mHealth applications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(7):692–706, 2014. 3

BIBLIOGRAFÍA

- [8] Mustafa Ismael Salman, Chee Kyun Ng, Nor Kamariah Noordin, Borhanuddin Mohd Ali, and Aduwati Sali. A self-configured link adaptation for green LTE downlink transmission. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 26(2):258–275, 2015.
- [9] Ayad Atiyah Abdulkafi, David Chieng, Tiong Sieh Kiong, Alvin Ting, Johnny Koh, and Abdulaziz M Ghaleb. Energy-aware load adaptive framework for LTE heterogeneous network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(9):943–953, 2014. 3
- [10] Marwane Ben Hcine and Ridha Bouallegue. On the dimensioning of LTE and LTE-advanced networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2015. 3, 15
- [11] Ayman ElNashar, Mohamed El-saidny, and Mahmoud Sherif. *Design, deployment and performance of 4G-LTE networks: A practical approach*. John Wiley & Sons, 2014. XI, 29, 31, 84, 88, 115
- [12] Jyrki TJ Penttinen. *The LTE/SAE Deployment Handbook*. John Wiley & Sons, 2011. X, X, X, X, 40, 41, 42, 43, 111
- [13] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker. *LTE: the UMTS long term evolution*. Wiley Online Library, 2009. 3, 19, 33, 90
- [14] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for UMTS: HSPA evolution and LTE*. John Wiley & Sons, 2010. 3
- [15] Harri Holma, Antti Toskala, et al. *WCDMA for UMTS*, volume 2006. John Wiley & Sons, 2000. 3, 43
- [16] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, and Per Beming. *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press, 2010. 4, 8, 30, 84, 90
- [17] E. Metsälä and J. Salmelin. *LTE Backhaul: Planning and Optimization*. Wiley, 2015. 4, 162
- [18] Thomas Martin Knoll. A combined capex and opex cost model for lte networks. In *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), 2014 16th International*, pages 1–6. IEEE, 2014. 4, 162

-
- [19] 4G Americas. 4G Mobile Broadband Evolution: Release 10, Release 11 and Beyond HSPA+, SAE LTE and LTE Advanced. Technical report, 4G Americas, 2012. 7, 8
- [20] 4G Americas. Mobile Broadband Explosion, 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced. Technical report, 4G Americas, 2011. 7
- [21] Harri Holma and Antti Toskala. *HSDPA/HSUPA for UMTS: high speed radio access for mobile communications*. John Wiley & Sons, 2007. 7, 40
- [22] Ana Rita Luzio, João Venturinha Gomes, and Pedro Vieira. Performance Gain Evaluation from High Speed Packet Access Evolution (HSPA+). *Procedia Technology*, 17:720–727, 2014. 8
- [23] Nesrine Belhadj, Basma Oueslati, and Taoufik Aguil. Adjustment of Cost231 Walfisch-Ikegami model for HSPA+ in Tunisian urban environments. In *Web Applications and Networking (WSWAN), 2015 2nd World Symposium on*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [24] Mehmet Yavuz, Farhad Meshkati, Sanjiv Nanda, Akhilesh Pokhariyal, Nick Johnson, Balaji Raghothaman, and Andy Richardson. Interference management and performance analysis of umts/hspa+ femtocells. *IEEE Communications Magazine*, 47(9):102–109, 2009. 8
- [25] Erik G Larsson, Ove Edfors, Fredrik Tufvesson, and Thomas L Marzetta. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):186–195, 2014. 8
- [26] Christopher Cox and Baggy Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2014. 11
- [27] Jyrki TJ Penttinen. *The LTE-Advanced Deployment Handbook: The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks*. John Wiley & Sons, 2016. 11, 13, 15
- [28] 4G Americas. Beyond LTE: Enabling Mobile Broadband Explosion. Technical report, 4G Americas, 2014. IX, 11, 14
- [29] Alain Sibille, Claude Oestges, and Alberto Zanella. *MIMO: from theory to implementation*. Academic Press, 2010. 11

BIBLIOGRAFÍA

- [30] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013. 12
- [31] Ayaz Khan Afridi. *Macro and femto network aspects for realistic LTE usage scenarios*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, 2011. 12
- [32] Seppo Hämmäläinen, Henning Sanneck, and Cinzia Sartori. *LTE self-organising networks (SON): network management automation for operational efficiency*. John Wiley & Sons, 2012. 13
- [33] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE advanced: 3GPP solution for IMT-Advanced*. John Wiley & Sons, 2012. 13
- [34] Jeffrey G Andrews. Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift. *IEEE Communications Magazine*, 51(3):136–144, 2013. 13, 54, 58, 87, 129, 139
- [35] NS Nkordeh, AA Atayero, FE Idachaba, and OO Oni. Lte network planning using the hata-okumura and the cost-231 hata pathloss models. 2014. 15, 43
- [36] Miguel A. del Arco-Vega, Lucas Cuadra, José Antonio Portilla-Figueras, and Sancho Salcedo-Sanz. Near-optimal user assignment in LTE mobile networks with evolutionary computing. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, pages n/a–n/a, 2017. ett.3132. 16, 17, 18, 40, 55, 57, 60, 61, 63, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 81, 82, 84, 85, 86, 103, 104, 116, 117, 127, 129, 131, 132, 155, 161, 162, 164
- [37] Christopher Cox. *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012. p. 71, Fig 4.10. 19, 31
- [38] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE for UMTS: Evolution to LTE-advanced*. John Wiley & Sons, 2011. IX, IX, IX, IX, IX, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
- [39] 3GPP. TR27.001 Specification. Technical report, 3GPP, 2015. [Online]. Available: www.3gpp.org/DynaReport/27001.htm. 21
- [40] 3GPP. TR36-306 Specification. Technical report, 3GPP, 2015. [Online]. Available: www.3gpp.org/dynareport/36306.htm. xv, 22, 23
- [41] 3GPP. TR36.600 Specification. Technical report, 3GPP, 2015. [Online]. Available: www.3gpp.org/dynareport/36300.htm. 27, 28

-
- [42] Francesco Capozzi, Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, and Pietro Camarda. Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2):678–700, 2013. 30, 35, 36, 87, 89
- [43] Suk-Bok Lee, Ioannis Pefkianakis, Adam Meyerson, Shugong Xu, and Songwu Lu. Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2611–2615. IEEE, 2009.
- [44] Ellen L Hahne. Round-robin scheduling for max-min fairness in data networks. *Selected areas in Communications, IEEE Journal on*, 9(7):1024–1039, 1991. 30, 89
- [45] K Fazal and S Kaiser. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 30, 90
- [46] 3GPP. “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception”. Technical report, ETSI, France, 2011. Technical Specification Name: 3GPP TS 36.104 version 10.2.0 Release 10. XV, 32
- [47] 3GPP. “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”. Technical report, ETSI, France, 2010. Technical Specification Name: 3GPP TS 36.213 version 9.2.0 Release 9. XV, XV, XV, 33, 34, 90, 116
- [48] Birgitta Olin, Henrik Nyberg, and Magnus Lundevall. A novel approach to wcdma radio network dimensioning. In *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, volume 5, pages 3443–3447. IEEE, 2004. 40
- [49] Abbas Jamalipour, Vinod Mirchandani, and M Rubaiyat Kibria. Dimensioning of an enhanced 4g/b3g infrastructure for voice traffic. In *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 3, pages 2003–2007. IEEE, 2005. 43
- [50] Zdenek Ruzicka and Stanislav Hanus. Radio network dimensioning in umts network planning process. In *2005 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, pages 1–4. IEEE, 2005. 43
- [51] S Abdul Basit. Dimensioning of LTE network description of models and tool, coverage and capacity estimation of 3GPP long term evolution radio interface. *Universidade de Tecnologia, Helsinki*, 77, 2009. X, X, XVI, 44, 45, 140, 141, 145

BIBLIOGRAFÍA

- [52] Nafiz Imtiaz Bin Hamid, Mohammad T Kawser, and Md Ashraf ul Hoque. Coverage and capacity analysis of lte radio network planning considering dhaka city. *International Journal of Computer Applications*, 46(15):49–56, 2012. 47
- [53] Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich, and Markus Rupp. System level simulation of lte networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st*, pages 1–5. IEEE, 2010. 47, 52
- [54] J Salo, M Nur-Alam, and K Chang. Practical introduction to lte radio planning. *A white paper on basics of radio planning for 3GPP LTE in interference limited and coverage limited scenarios, European Communications Engineering (ECE) Ltd, Espoo, Finland*, 2010. 47
- [55] Marwa Elbagir Mohammed and Khalid Hamid Bilal. Lte radio planning using atoll radio planning and optimization software. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(10):1460–146, 2014. 47
- [56] Liang Zhang. Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution, 2010. XVI, 47, 140, 141, 145
- [57] Wrap International radio network planning. <http://wrap.se/tools/>. Accessed: 2016-05-30. 47
- [58] Rekawt Sabir Hassan, TA Rahman, and AY Abdulrahman. Lte coverage network planning and comparison with different propagation models. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 12(1):153–162, 2014. 47
- [59] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, and Pietro Camarda. Simulating lte cellular systems: an open-source framework. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(2):498–513, 2011. 48, 53
- [60] Forsk atoll radio planning software. <http://www.forsk.com/atoll/>. Accessed: 2016-05-30. 48, 49
- [61] SA Menthum. Menthum planet: Market leading, state-of-the-art planning and optimization software solutions for wireless access networks. 2008. 49
- [62] Infovista mentum planet radio planning software. <http://www.infovista.com/products/Mentum-Planet-Live-RF-planning-and-optimization>. Accessed: 2016-05-30. 50

-
- [63] Teoco asset radio planning. <http://www.teoco.com/products/planning-optimization/asset-radio-planning/>. Accessed: 2016-05-30. 50
- [64] Teoco automatic cell planning. <http://www.teoco.com/products/planning-optimization/capesso-automatic-cell-planning>. Accessed: 2016-05-30. 50
- [65] Politecnico di Bari lte simulator. <http://telematics.poliba.it/LTE-Sim>. Accessed: 2016-05-30. 50, 51
- [66] Takafumi Kawajiri, Junji Yamada, Kenji Uehiro, Daisuke Tanigawa and Naoki Nakaminami. LTE Cell Planning Support Tool (CELPLA L). Technical report, NTT Docomo, 2012. 51, 52
- [67] University of Wien lte simulators. <https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vienna-lte-a-simulators//>. Accessed: 2016-05-30. 52
- [68] Christian Mehlführer, Martin Wrulich, Josep Colom Ikuno, Dagmar Bosanska, and Markus Rupp. Simulating the long term evolution physical layer. In *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, pages 1471–1478. IEEE, 2009. 52
- [69] Fjolla Ademaj, Martin Taranetz, and Markus Rupp. 3gpp 3d mimo channel model: a holistic implementation guideline for open source simulation tools. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016(1):1, 2016. 52
- [70] Danny Finn, Hamed Ahmadi, Rouzbeh Razavi, Holger Claussen, and Luiz DaSilva. Energy and spectral efficiency gains from multi-user mimo-based small cell reassignments. In *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–7. IEEE, 2015. 53
- [71] Duy-Huy Nguyen, Hang Nguyen, and Éric Renault. We-mqs: A new lte down-link scheduling scheme for voice services based on user perception. *International journal of computer applications (IJCA)*, 142(10):28–36, 2016. 53
- [72] Po-Chiang Lin, Lionel F Gonzalez Casanova, and Bakary KS Fatty. Data-driven handover optimization in next generation mobile communication networks. *Mobile Information Systems*, 2016, 2016. 53

BIBLIOGRAFÍA

- [73] Jeffrey G Andrews, Sarabjot Singh, Qiaoyang Ye, Xingqin Lin, and Harpreet S Dhillon. An overview of load balancing in HetNets: Old myths and open problems. *IEEE Wireless Communications*, 21(2):18–25, 2014. 54, 55, 56, 58, 87, 129, 130, 139
- [74] Aleksandar Damnjanovic, Juan Montojo, Yongbin Wei, Tingfang Ji, Tao Luo, Madhavan Vajapeyam, Taesang Yoo, Osok Song, and Durga Malladi. A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 18(3):10–21, 2011. 54, 87, 129, 139
- [75] Antonis Gotsis, Stelios Stefanatos, and Angeliki Alexiou. Ultradense networks: The new wireless frontier for enabling 5g access. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(2):71–78, 2016. 55, 87, 129, 139, 154
- [76] Antonis G Gotsis and Athanasios D Panagopoulos. On user association and multiple access optimisation in 5G massive MIMO empowered ultra dense networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2016. 55, 61, 70, 76, 84, 86, 87, 104, 139, 164, 166
- [77] Antonis G Gotsis, Stelios Stefanatos, and Angeliki Alexiou. Optimal user association for massive mimo empowered ultra-dense wireless networks. In *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, pages 2238–2244. IEEE, 2015. 55, 87, 129, 154
- [78] Jeffrey G Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V Hanly, Angel Lozano, Anthony CK Soong, and Jianzhong Charlie Zhang. What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1065–1082, 2014. 55, 139
- [79] Akhil Gupta and Rakesh Kumar Jha. A survey of 5G network: architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3:1206–1232, 2015.
- [80] Qian Clara Li, Huaning Niu, Apostolos Tolis Papathanassiou, and Geng Wu. 5G network capacity: key elements and technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):71–78, 2014.
- [81] Dantong Liu, Lifeng Wang, Yue Chen, Maged ElKashlan, Kai-Kit Wong, Robert Schober, and Lajos Hanzo. User association in 5G networks: A survey and an outlook. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2):1018–1044, 2016. 55, 139

-
- [82] Insoo Hwang, Bongyong Song, and Samir S Soliman. A holistic view on hyperdense heterogeneous and small cell networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(6):20–27, 2013. 55, 139
- [83] Maryam Chinipardaz, Mehdi Rasti, and Majid Nourhosseini. An overview of cell association in heterogeneous network: Load balancing and interference management perspective. In *Telecommunications (IST), 2014 7th International Symposium on*, pages 1250–1256. IEEE, 2014. 55, 56, 57, 58, 75, 83, 84, 116, 132, 139
- [84] Yonglong Zhang, Dilip Bethanabhotla, Tianyu Hao, and Konstantinos Psounis. Near-optimal user-cell association schemes for real-world networks. In *Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2015*, pages 204–213. IEEE, 2015. 55, 70, 83, 84, 103, 164
- [85] Qiaoyang Ye, Beiyu Rong, Yudong Chen, Mazin Al-Shalash, Constantine Caramanis, and Jeffrey G Andrews. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(6):2706–2716, 2013. 56, 57, 58, 59, 61, 62, 75, 76, 130
- [86] Hongseok Kim, Gustavo de Veciana, Xiangying Yang, and Muthaiah Venkatachalam. α -optimal user association and cell load balancing in wireless networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2010. 56, 58, 59, 60, 70, 84, 86, 87, 104, 130, 155, 164, 166
- [87] Jaturong Sangiamwong, Yuya Saito, Nobuhiko Miki, Tetsushi Abe, Satoshi Nagata, and Yukihiro Okumura. Investigation on cell selection methods associated with inter-cell interference coordination in heterogeneous networks for LTE-advanced downlink. In *Wireless Conference 2011-Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), 11th European*, pages 1–6. VDE, 2011. 56, 57, 75, 84, 116, 132
- [88] Guan-Ting Chou, Kuang-Hao Stanley Liu, and Szu-Lin Su. Load-based cell association for load balancing in heterogeneous cellular networks. In *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on*, pages 1681–1686. IEEE, 2015. 56
- [89] 3GPP. TR36.872 Specification. Technical report, 3GPP, 2013. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/dynareport/36872.htm>. 57

BIBLIOGRAFÍA

- [90] Hongseok Kim, Gustavo De Veciana, Xiangying Yang, and Muthaiah Venkatachalam. Distributed α -optimal user association and cell load balancing in wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20(1):177–190, 2012. 57, 58, 59, 60, 62, 70, 83, 84, 86, 87, 104, 116, 132, 164, 166
- [91] Jeffrey Wildman, Yusuf Osmanlioglu, Steven Weber, and Ali Shokoufandeh. Delay minimizing user association in cellular networks via hierarchically well-separated trees. In *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 4005–4011. IEEE, 2015. 57, 58, 59, 60, 61, 62, 70, 71, 75, 76, 84, 85, 86, 87, 104, 164, 166
- [92] Ekram Hossain, Mehdi Rasti, Hina Tabassum, and Amr Abdelnasser. Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective. *IEEE Wireless Communications*, 21(3):118–127, 2014. 57, 75
- [93] Kaiming Shen and Wei Yu. Distributed pricing-based user association for down-link heterogeneous cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1100–1113, 2014. 57, 75
- [94] Aimin Sang, Xiaodong Wang, Mohammad Madihian, and Richard D Gitlin. Coordinated load balancing, handoff/cell-site selection, and scheduling in multi-cell packet data systems. *Wireless Networks*, 14(1):103–120, 2008. 57, 58, 59, 75
- [95] Kyuho Son, Song Chong, and Gustavo De Veciana. Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(7):3566–3576, 2009. 59
- [96] Balaji Rengarajan and Gustavo De Veciana. Practical adaptive user association policies for wireless systems with dynamic interference. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 19(6):1690–1703, 2011.
- [97] Prashanth Hande, Shailesh Patil, and Hyung G Myung. Distributed load-balancing in a multi-carrier wireless system. In *WCNC*, pages 1748–1753, 2009. 58
- [98] Sajal K Das, Sanjoy K Sen, and Rajeev Jayaram. A dynamic load balancing strategy for channel assignment using selective borrowing in cellular mobile environment. *Wireless Networks*, 3(5):333–347, 1997. 58

-
- [99] Sajal K Das, Sanjoy K Sen, and Rajeev Jayaram. A novel load balancing scheme for the tele-traffic hot spot problem in cellular networks. *Wireless Networks*, 4(4):325–340, 1998.
- [100] Hua Jiang and Stephen S Rappaport. Cbwl: A new channel assignment and sharing method for cellular communication systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(2):313–322, 1994.
- [101] Tomsonoe Kahwa and Nicolaos Georganas. A hybrid channel assignment scheme in large-scale, cellular-structured mobile communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 26(4):432–438, 1978. 58
- [102] Harpreet S Dhillon, Radha Krishna Ganti, and Jeffrey G Andrews. Load-aware modeling and analysis of heterogeneous cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(4):1666–1677, 2013. 58
- [103] Sarabjot Singh and Jeffrey G Andrews. Joint resource partitioning and offloading in heterogeneous cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(2):888–901, 2014.
- [104] Han-Shin Jo, Young Jin Sang, Ping Xia, and Jeffrey G Andrews. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink SINR analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(10):3484–3495, 2012. 58
- [105] Suman Das, Harish Viswanathan, and Gee Rittenhouse. Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems. In *INFOCOM 2003. Twenty-second annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. IEEE societies*, volume 1, pages 786–796. IEEE, 2003. 58
- [106] Yigal Bejerano and Seung-Jae Han. Cell breathing techniques for load balancing in wireless LANs. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(6):735–749, 2009. 58
- [107] Dave Cavalcanti, Dharma Agrawal, Carlos Cordeiro, Bin Xie, and Anup Kumar. Issues in integrating cellular networks w lans, and manets: a futuristic heterogeneous wireless network. *IEEE Wireless Communications*, 12(3):30–41, 2005. 58
- [108] Evsen Yanmaz and Ozan K Tonguz. Dynamic load balancing and sharing performance of integrated wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(5):862–872, 2004. 58

BIBLIOGRAFÍA

- [109] Dusit Niyato and Ekram Hossain. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach. *IEEE transactions on vehicular technology*, 58(4):2008–2017, 2009. 58
- [110] Ehsan Aryafar, Alireza Keshavarz-Haddad, Michael Wang, and Mung Chiang. RAT selection games in HetNets. In *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, pages 998–1006. IEEE, 2013.
- [111] Rajender Kumar and Brahmjit Singh. Enhanced Availability Rate and Load Balance in Emerging Heterogeneous Wireless Network Using Proactive Group Vertical Handover Algorithm. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 6(1):9–24, 2013. 58
- [112] Enrique Stevens-Navarro, Yuxia Lin, and Vincent WS Wong. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(2):1243–1254, 2008. 58
- [113] Salah Eddine Elayoubi, Eitan Altman, Majed Haddad, and Zwi Altman. A hybrid decision approach for the association problem in heterogeneous networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2010. 58
- [114] Tianqing Zhou, Yongming Huang, Wei Huang, Shidang Li, Yuan Sun, and Luxi Yang. QoS-aware user association for load balancing in heterogeneous cellular networks. In *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, pages 1–5. IEEE, 2014. 58
- [115] Renesas-Mobile-Europe-Ltd. 3GPP R1-133246. In *3GPP TSG RAN WG1 Meeting 74 Barcelona, Spain, 19th – 23th August 2013*, pages 1–5. 3GPP, 2013. 58, 70, 84, 164
- [116] Masato Uchida and Jim Kurose. An information-theoretic characterization of weighted α -proportional fairness in network resource allocation. *Information Sciences*, 181(18):4009–4023, 2011. 59
- [117] Jeonghoon Mo and Jean Walrand. Fair end-to-end window-based congestion control. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 8(5):556–567, 2000. 59, 60
- [118] Yigal Bejerano, Seung-Jae Han, and Li Erran Li. Fairness and load balancing in wireless LANs using association control. In *Proceedings of the 10th annual*

-
- international conference on Mobile computing and networking*, pages 315–329. ACM, 2004. 59
- [119] Ruoyu Sun, Mingyi Hong, and Zhi-Quan Luo. Joint downlink base station association and power control for max-min fairness: Computation and complexity. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(6):1040–1054, 2015. 59
- [120] Dilip Bethanabhotla, Ozgun Y Bursalioglu, Haralabos C Papadopoulos, and Giuseppe Caire. Optimal user-cell association for massive MIMO wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(3):1835–1850, 2016. 59, 61, 62, 70, 84, 164
- [121] Jeffrey Wildman, Yusuf Osmanl, Steven Weber, Ali Shokoufandeh, et al. A primal-dual approach to delay minimizing user association in cellular networks. In *2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pages 293–300. IEEE, 2015. 60, 61, 70, 84, 86, 87, 89, 90, 104, 164, 166
- [122] Dilip Bethanabhotla, Ozgun Y Bursalioglu, Haralabos C Papadopoulos, and Giuseppe Caire. User association and load balancing for cellular massive MIMO. In *Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2014*, pages 1–10. IEEE, 2014. 61
- [123] Maziar Sanjabi, Meisam Razaviyayn, and Zhi-Quan Luo. Optimal joint base station assignment and downlink beamforming for heterogeneous networks. In *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 2821–2824. IEEE, 2012. 62
- [124] Mingyi Hong and Zhi-Quan Luo. Distributed linear precoder optimization and base station selection for an uplink heterogeneous network. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(12):3214–3228, 2013. 62
- [125] Steven Corroy, Laetitia Falconetti, and Rudolf Mathar. Dynamic cell association for downlink sum rate maximization in multi-cell heterogeneous networks. In *2012 IEEE international conference on communications (ICC)*, pages 2457–2461. IEEE, 2012. 62
- [126] Kenneth A De Jong. *Evolutionary computation: a unified approach*. MIT press, 2006. 63

BIBLIOGRAFÍA

- [127] Kumara Sastry, David E Goldberg, and Graham Kendall. Genetic algorithms. In *Search methodologies*, pages 93–117. Springer, 2014. 63, 96, 98
- [128] Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998. 63
- [129] Agoston E Eiben and Jim Smith. From evolutionary computation to the evolution of things. *Nature*, 521(7553):476–482, 2015. 63, 64, 86, 92, 93, 94
- [130] Dan Simon. *Evolutionary optimization algorithms*. John Wiley & Sons, 2013. 86, 92
- [131] Dipankar Dasgupta and Zbigniew Michalewicz. *Evolutionary algorithms in engineering applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [132] Matej Črepinšek, Shih-Hsi Liu, and Marjan Mernik. Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(3):35, 2013. 63, 64, 65, 92
- [133] William B Langdon and Riccardo Poli. *Foundations of genetic programming*. Springer Science & Business Media, 2013. 63
- [134] John R Koza. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, volume 1. MIT press, 1992. 63
- [135] Nikolaus Hansen. The CMA evolution strategy: A tutorial. *arXiv preprint arXiv:1604.00772*, 2016. 63
- [136] Leila Kallel, Bart Naudts, and Alex Rogers. *Theoretical aspects of evolutionary computing*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [137] Agoston E Eiben and Marc Schoenauer. Evolutionary computing. *Information Processing Letters*, 82(1):1–6, 2002. 63
- [138] Agoston E Eiben and James E Smith. *Introduction to evolutionary computing*. Springer Science & Business Media, 2003. 63, 86, 94, 96
- [139] Zbigniew Michalewicz. *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. Springer Science & Business Media, 2013. 63, 65
- [140] David B Fogel. What is evolutionary computation? *IEEE Spectrum*, 37(2):26–28, 2000. 64

-
- [141] David E Golberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, 1989:102, 1989. 64, 65, 98
- [142] Cristian Tomasetti, Lu Li, and Bert Vogelstein. Stem cell divisions, somatic mutations, cancer etiology, and cancer prevention. *Science*, pages n/a–n/a, 2017. 64, 93
- [143] L Darrell Whitley et al. The genitor algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best. In *ICGA*, volume 89, pages 116–123, 1989. 65
- [144] David E Goldberg and Kalyanmoy Deb. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. *Foundations of genetic algorithms*, 1:69–93, 1991. 65
- [145] Andries P Engelbrecht. *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons, 2007. 66
- [146] Jin-Yuan Wang, Jun-Bo Wang, Xiaoyu Song, Ming Chen, and Jie Zhang. Network planning for distributed antenna-based high-speed railway mobile communications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(7):707–722, 2014. 66
- [147] Fernando Jaimes-Romero and David Muñoz-Rodríguez. Evolutionary searching in cellular radio systems planning. *European transactions on telecommunications*, 10(1):85–96, 1999. 66
- [148] L Cuadra, A Aybar-Ruíz, MA del Arco, J Navío-Marco, JA Portilla-Figueras, and S Salcedo-Sanz. A Lamarckian Hybrid Grouping Genetic Algorithm with repair heuristics for resource assignment in WCDMA networks. *Applied Soft Computing*, pages 619–632, 2016. 67
- [149] L Cuadra, S Salcedo-Sanz, AD Carnicer, MA Del Arco, and JA Portilla-Figueras. A novel grouping genetic algorithm for assigning resources to users in wcdma networks. In *Applications of Evolutionary Computation*, pages 42–53. Springer, 2015. 67
- [150] Ons Abdelkhalek, Saoussen Krichen, and Adel Guitouni. A genetic algorithm based decision support system for the multi-objective node placement problem in next wireless generation network. *Applied Soft Computing*, 33:278–291, 2015. 67

BIBLIOGRAFÍA

- [151] Oscar Alonso-Garrido, Sancho Salcedo-Sanz, Luis E Agustín-Blas, Emilio G Ortiz-García, AM Pérez-Bellido, and José Antonio Portilla-Figueras. A hybrid grouping genetic algorithm for the multiple-type access node location problem. In *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAL 2009*, pages 376–383. Springer, 2009. 67
- [152] Christopher Rose and Roy D Yates. Genetic algorithms and call admission to telecommunications networks. *Computers & Operations Research*, 23(5):485–499, 1996. 67
- [153] Xu Yang, Yapeng Wang, Dapeng Zhang, and Laurie Cuthbert. Resource allocation in LTE OFDMA systems using genetic algorithm and semi-smart antennas. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010. 67, 71, 85, 164
- [154] NF Tuban, MF Azman, KA Noordin, and MF Ismail. Genetic algorithm approach for dynamic configuration of Multicast Broadcast Single Frequency Network deployment in LTE. In *Information Technology and Multimedia (ICIM), 2011 International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2011. 67
- [155] Mehmet E Aydin, Raymond Kwan, Wei Ding, and Joyce Wu. A Genetic Algorithm Approach for Multiuser Scheduling on the LTE Downlink. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*, volume 2, 2012. 67
- [156] Alessandro Chiumento, Carolina Blanch, Claude Desset, Sofie Polling, Liesbet Van der Perre, and Rudy Lauwereins. Multi-objective genetic algorithm downlink resource allocation in LTE: Exploiting the cell-edge vs. Cell-center trade-off. In *Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2014 IEEE 21st Symposium on*, pages 116–120. IEEE, 2014. 67
- [157] Yao-Liang Chung. An efficient genetic-based downlink resource allocation scheme in LTE base stations. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 26(4):1669–1673, 2014.
- [158] R Sorna Keerthi et al. Improved channel estimation using genetic operators for LTE downlink system. In *Science Engineering and Management Research (IC-SEMR), 2014 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [159] Naga Raghavendra Surya Vara Prasad Koppiseti, Shankhanaad Mallick, and Vijay K Bhargava. Design of adaptive antenna systems for LTE using Genetic

- Algorithm and Particle Swarm Optimization. In *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2015 IEEE 28th Canadian Conference on*, pages 1054–1059. IEEE, 2015. 67, 68, 71, 85, 164
- [160] Safa Essassi, Sofiane Cherif, and Mohamed Siala. RB allocation based on genetic algorithm and coordination over the X 2 interface in the LTE uplink. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pages 2424–2428. IEEE, 2013. 67, 71, 85
- [161] Saulo Henrique da Mata and Paulo Roberto Guardieiro. A Genetic Algorithm based approach for resource allocation in LTE uplink. In *Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, pages 1–5. IEEE, 2014. 67, 68, 71, 85
- [162] Kongluan Lin. Improving Energy Efficiency of LTE Networks by Applying Genetic Algorithm (GA). In *Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC), 2011 IEEE Ninth International Conference on*, pages 593–597. IEEE, 2011. 67, 68, 71, 85
- [163] Konstantinos Asimakis, Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Genetic optimization for spectral efficient multicasting in LTE systems. In *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2012 5th Joint IFIP*, pages 54–59. IEEE, 2012. 68
- [164] Hakim Ghazzai, Elias Yaacoub, Mohamed Slim Alouini, and Adnan Abu-Dayya. A genetic algorithm solution for the operation of green LTE networks with energy and environment considerations. In *Neural Information Processing*, pages 512–519. Springer, 2012. 67, 68, 71, 85
- [165] Aida Al-Samawi, Aduwati Sali, Nor Kamariah Noordin, Marini Othman, and Fazirulhisyam Hashim. Base station location optimisation in LTE using Genetic Algorithm. In *ICT Convergence (ICTC), 2013 International Conference on*, pages 336–341. IEEE, 2013. 67, 68, 71, 85
- [166] Ioannis K Valavanis, Georgia Athanasiadou, Dimitra Zarbouti, and George V Tsoulos. Base-Station Location Optimization for LTE Systems with Genetic Algorithms. In *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2014. 67, 68, 71, 85
- [167] Sarah M Azzam and Tallal Elshabrawy. Re-Dimensioning Number of Active eNodeBs for Green LTE Networks Using Genetic Algorithms. In *European Wireless*

BIBLIOGRAFÍA

- 2015; *21th European Wireless Conference; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2015. 67, 68, 71, 85
- [168] Yikang Xiang, Jijun Luo, and Christian Hartmann. Inter-cell interference mitigation through flexible resource reuse in OFDMA based communication networks. In *European wireless*, volume 2007, pages 1–7, 2007. 67
- [169] Fan Xiangning, Chen Si, and Zhang Xiaodong. An inter-cell interference coordination technique based on users' ratio and multi-level frequency allocations. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on*, pages 799–802. IEEE, 2007. 67
- [170] Changkyu Kim, Russell Ford, and Sundeeep Rangan. Joint interference and user association optimization in cellular wireless networks. In *2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 511–515. IEEE, 2014. 70, 84, 86, 87, 104, 164, 166
- [171] Ramon Ferrus, J Olmos, and Hiram Galeana. Evaluation of a cell selection framework for radio access networks considering backhaul resource limitations. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, pages 1–5. IEEE, 2007. 83
- [172] Juan J Olmos, Ramon Ferrus, and Hiram Galeana-Zapién. Analytical modeling and performance evaluation of cell selection algorithms for mobile networks with backhaul capacity constraints. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 12(12):6011–6023, 2013. 83
- [173] Zeljko Savic. LTE Design and Deployment Strategies. In *Cisco EXPO 2011, Saudi Arabia*. Cisco, 2011. 87
- [174] Günter Rudolph. Convergence analysis of canonical genetic algorithms. *IEEE transactions on neural networks*, 5(1):96–101, 1994. 87, 99
- [175] Hans-Georg Beyer. *The theory of evolution strategies*. Springer Science & Business Media, 2013. 87
- [176] Lukáš Klozar and Jan Prokopec. Propagation path loss models for mobile communication. In *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2011 21st International Conference*, pages 1–4. IEEE, 2011. 90, 115, 116
- [177] Kyōhei Fujimoto. *Mobile antenna systems handbook*. Artech house, 2008. 90, 115

-
- [178] Daniel Berend and Tamir Tassa. Improved bounds on Bell numbers and on moments of sums of random variables. *Probability and Mathematical Statistics*, 30(2):185–205, 2010. 91
- [179] Randy L Haupt and Sue Ellen Haupt. *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons, 2004. 96
- [180] Kim-Fung Man, Kit Sang TANG, and Sam Kwong. *Genetic algorithms: concepts and designs*. Springer Science & Business Media, 2012. 96
- [181] Yong Deng, Yang Liu, and Deyun Zhou. An improved genetic algorithm with initial population strategy for symmetric TSP. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015:212794, 2015. 97
- [182] Chien-Chou Lin. Hierarchical path planning for manipulators based on genetic algorithm with non-random initial population. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(3):1773–1786, 2012.
- [183] Vedat Toğan and Ayşe T Daloğlu. An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping. *Computers & Structures*, 86(11):1204–1218, 2008. 97
- [184] Heinz Mühlenbein and Dirk Schlierkamp-Voosen. Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm I. Continuous Parameter Optimization. *Evolutionary computation*, 1(1):25–49, 1993. 98
- [185] Brad L Miller and David E Goldberg. Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. *Complex Systems*, 9(3):193–212, 1995. 98, 99
- [186] Seppo Pohjolainen. *Mathematical Modelling*. Springer, 2016. 99
- [187] J.E Sánchez-García, A. M Ahmadzadeh, B. Saavedra-Moreno, S. Salcedo-Sanz, and A. Portilla-Figueras. Strategic Methods for Radio Access Design in 2G/3G Networks. In *3 International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight '11), Spain 9-11 May 2011*, pages 4307–4311. IEEE, 2011. 102
- [188] Juan Eulogio Sánchez-García, Amir M Ahmadzadeh, Silvia Jiménez-Fernández, Sancho Salcedo-Sanz, and J Antonio Portilla-Figueras. Impact of the HSPDA-based mobile broadband access on the investment of the 3G access network. In *Mobile Lightweight Wireless Systems*, pages 303–311. Springer, 2011.

BIBLIOGRAFÍA

- [189] Sancho Salcedo-Sanz, Juan Eulogio Sanchez-Garcia, José Antonio Portilla-Figueras, Silvia Jimenez-Fernandez, and Amir M Ahmadzadeh. A coral-reef optimization algorithm for the optimal service distribution problem in mobile radio access networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(11):1057–1069, 2014. 102
- [190] Paul Noumba Um. *A model for calculating interconnection costs in telecommunications*. World Bank Publications, 2004. 102
- [191] Costas Courcoubetis and Richard Weber. Pricing communication networks, 2003. 102
- [192] European Commission. “European Commission Recommendation about interconnections. Second Part: Cost accounting and account division”, April 8, 1998. DOCE L 146 13.5.98, pp. 6-35. 102
- [193] CNMC. Broadband market: operator market share in Spain. <http://data.cnmc.es/datagraph/>, April 2016. 119, 145

Lista de Publicaciones

Publicaciones conseguidas durante los trabajos de investigación tendentes a la consecución de la Tesis Doctoral:

1. **del Arco-Vega, M. A.**, Cuadra, L., Portilla-Figueras, J. A., and Salcedo-Sanz, S. (2016). “Near-optimal user assignment in LTE mobile networks with evolutionary computing”. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, doi: 10.1002/ett.3132. **Índice de impacto: 1.295. Q2 (Engineering Electrical and Electronic Engineering).**
2. Cuadra, L., Aybar-Ruíz, A., **del Arco, M. A.**, Navío-Marco, J., Portilla-Figueras, J. A., and Salcedo-Sanz, S. (2016). “A Lamarckian Hybrid Grouping Genetic Algorithm with repair heuristics for resource assignment in WCDMA networks”. *Applied Soft Computing*, 43, 619-632. **Índice de impacto: 2.857. Q1 (Computer Science, Artificial Intelligence).**
3. Cuadra, L., Salcedo-Sanz, S., Carnicer, A. D., **del Arco, M. A.**, and Portilla-Figueras, J. A. (2015, April). “A novel grouping genetic algorithm for assigning resources to users in WCDMA networks”. In *European Conference on the Applications of Evolutionary Computation* (pp. 42-53). Springer International Publishing.
4. A.M. Ahmadzadeh, Lucas Cuadra, **Miguel A. del Arco-Vega**, J. Antonio Portilla-Figueras, Sancho Salcedo-Sanz. (2017) “Influence of overhead on LTE downlink performance: A comprehensive model” (2017). *Telecommunication Systems*. Under Minor Revisions. **Índice de impacto: 0.822. Q2 (Engineering Electrical and Electronic Engineering).**

