

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**GESTIÓN AVANZADA DE RECURSOS EN
REDES LTE: TÉCNICAS CoMP
(ADVANCED RESOURCE MANAGEMENT IN
LTE NETWORK : CoMP TECHNIQUES)**

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Paula Rodríguez Fernández

Octubre -
2015



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Paula Rodríguez Fernández
Director del TFG: Ramón Agüero Calvo
Título: “Gestión avanzada de recursos en redes LTE: técnicas CoMP”
Title: “Advanced resource management in LTE network: CoMP techniques “

Presentado a examen el día: 26 de Octubre del 2015

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):	José Basterrechea Verdeja
Secretario (Apellidos, Nombre):	Marta García Arranz
Vocal (Apellidos, Nombre):	Ramón Agüero Calvo

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado N°
(a asignar por Secretaría)

Abstract

The rapid evolution of wireless communications brings several technological challenges. Emerging and novel access techniques are being proposed to offer a better performance to the user. CoMP (Coordinated Multipoint) is one of the most relevant examples of such solutions, based on transmission and reception coordination between different elements of a LTE -Advanced system.

In such framework, the main objective of this work is to develop a C++ based simulation tool to model the behavior of these techniques over different LTE scenarios, applying a set of policies, so as to study the potential benefits that they can offer. Different metrics such as quality of service or the load of base stations and efficiency, are assessed. Throughout the work each parameter will be analyzed and the results are finally exhibited.

It is also worth highlighting that this project is within the open research lines of the Network Planning and Mobile Communications Laboratory is carrying out in the scope of the LEXNET European project. The main objective of LEXNET project is to establish appropriate design guidelines for components, and solutions that allow reducing the electromagnetic fields that are induced by wireless communications networks.

Resumen

La evolución continua de las comunicaciones inalámbricas supone un constante reto en el ámbito tecnológico. Surgiendo por ello, un creciente número de técnicas con el objetivo de ofrecer mayores prestaciones al usuario. Entre ellas, se encuentran las técnicas de cooperación denominadas CoMP (coordinated multipoint), las cuales se basan en la transmisión y recepción coordinada entre diferentes puntos de un sistema LTE-Advanced.

Atendiendo a lo anterior, el objetivo de este trabajo es la elaboración de una herramienta de simulación basada en un entorno C++, a partir de la cual se modelará el comportamiento de dichas técnicas en diferentes escenarios LTE, a los que se aplicarán una serie de criterios de conexión, con el fin de estudiar los posibles beneficios que éstas conllevan. Se valorarán diversas métricas, como la calidad de los servicios o la carga de las estaciones, así como la eficiencia de las soluciones analizadas. A lo largo del trabajo se analizarán los diferentes parámetros de mérito y se describirán los resultados obtenidos.

Además, se puede destacar que este trabajo se encuentra dentro del marco de investigación que el Grupo de Ingeniería Telemática ha venido llevando a cabo dentro del proyecto europeo Low EMF Exposure Networks (LEXNET), cuyo principal objetivo es el diseño de componentes y soluciones que permitan reducir la exposición de los usuarios a los campos electromagnéticos que producen las redes de comunicación inalámbricas.

Índice general

Abstract	I
Resumen	II
Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Estructura de la memoria	2
2 LTE	3
2.1 Introducción	3
2.1.1 Evolución de los sistemas móviles hasta LTE	3
2.1.2 Actualidad LTE	4
2.1.3 Futuro LTE	6
2.2 Características LTE	6
2.2.1 Tasas de datos	7
2.2.2 Esquema de transmisión	8
2.2.3 Técnicas MIMO	10
2.2.4 Técnicas CoMP	12
2.2.5 Sectorización	14
2.2.6 Modelos de propagación	15
3 Herramienta	18
3.1 Núcleo	18
3.2 Trazas, archivos de configuración y escenarios	19
3.3 Clases	21
4 Resultados	29
4.1 Fase Previa	29
4.2 Fase 2	33
4.2.1 Escenarios	33
4.2.2 Métricas	35

4.3	Fase 3	43
4.3.1	Escenarios	43
4.3.2	Métricas	44
5	Conclusiones	48

Índice de figuras

2.1	Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles . . .	5
2.2	Propagación multicamino	8
2.3	Transmisión Multiportadora [6]	9
2.4	Espectro de una subportadora ODFM y de una señal OFDM	9
2.5	Recursos físicos LTE en tiempo y frecuencia [6]	10
2.6	Esquema multiplexación de usuarios de LTE	11
2.7	Esquema OFDMA de LTE	11
2.8	Esquema DPS	13
2.9	Esquema JT	13
2.10	Área cubierta con círculos	14
2.11	Área cubierta con hexágonos	14
3.1	Esquema del simulador empleado	21
3.2	Incorporación de clases al núcleo	22
3.3	Diagrama de estados	26
4.1	Distribución estaciones base	30
4.2	Función de distribución acumulada de la SINR	30
4.3	Potencia recibida según el número de antenas	31
4.4	Incremento de potencia en función del número de antenas . .	32
4.5	Calidad de servicio	37
4.6	Trasposos	38
4.7	Carga media de las estaciones base	39
4.8	Función de distribución acumulada de la carga de las estacones con 50 usuarios	40
4.9	Función de distribución acumulada de la carga de las estacones con 250 usuarios	40
4.10	Función de distribución acumulada de la carga de las estacones con 450 usuarios	41
4.11	Relación resource blocks-Tráfico	41
4.12	Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estacones con 50 usuarios	42
4.13	Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estacones con 250 usuarios	43
4.14	Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estacones con 450 usuarios	43

4.15	Calidad del servicio para servicio 1	45
4.16	Calidad del servicio para servicio 2	45
4.17	Carga media de las estaciones base	46
4.18	Función de distribución acumulada de número de estaciones	46
4.19	Resource blocks/Tráfico	47

Índice de tablas

2.1	Modelo de propagación	16
2.2	Probabilidad de LOS	16
2.3	Pérdidas por acoplamiento (MCL)	17
3.1	Tipos de traspasos	28

Capítulo 1

Introducción

Las comunicaciones móviles se caracterizan por estar en continua evolución, apareciendo nuevas tecnologías con el fin de garantizar a los usuarios una mínima calidad de servicio acorde con la tasa de datos que se requiere. Tras el paso por sucesivas generaciones, actualmente nos encontramos en la cuarta (4G), tecnología LTE, la cual, en comparación con la anterior, ofrece una mayor velocidad de datos y menor latencia, a través de una arquitectura de red “Todo IP”.

Debido a esta constante evolución, surge en la sociedad actual una gran dependencia de estas comunicaciones, que se traduce en un gran auge de las redes de datos (sobre todo con la aparición de los smartphones, tablets y notebooks) y mayores requerimientos tecnológicos.

Una alta eficiencia espectral es una característica especialmente importante en este tipo de redes. Para incrementarla, LTE hace uso de técnicas MIMO y OFDM; sin embargo, la interferencia entre células impide que esta tecnología llegue a las tasas máximas teóricas, por lo que recientemente se ha propuesto el uso de las técnicas CoMP (Coordinated Multi-Point) con el fin de disminuir esta.

Durante el desarrollo de esta memoria, tras una breve introducción a LTE, se explicarán los conceptos básicos y el funcionamiento de las técnicas CoMP, para luego analizarlas sobre escenarios de redes celulares.

Para la obtención de los resultados de este trabajo, se ha hecho uso de una herramienta de simulación creada por el Grupo de Ingeniería Telemática, modificándola para dotarla del comportamiento deseado.

1.1. Objetivos

A continuación se exponen los objetivos propuestos para este trabajo:

- Adaptación de la herramienta de simulación al entorno necesario para el desarrollo de este trabajo.
- Planteamiento y resolución de problemas en términos de técnicas CoMP.

- Estudio de los posibles beneficios de las técnicas CoMP, analizando diferentes marcos de trabajo.

1.2. Estructura de la memoria

A continuación se realiza un breve resumen del contenido de cada uno de los capítulos que conforman esta memoria.

- Capítulo 1: Introducción.

En el presente capítulo se ha realizado una introducción del tema sobre el que se centra este proyecto, estableciendo las metas a alcanzar y las motivaciones de las que se parten.

- Capítulo 2: LTE.

Se realizará una breve descripción de la evolución de las comunicaciones móviles, desde su comienzo hasta el día de hoy con la llegada de LTE; se comenta el papel que juega esta tecnología en la actualidad. Además, se explicarán sus características principales, así como las de como las técnicas CoMP, abordadas en la realización de este trabajo.

- Capítulo 3: Herramienta.

Se explicará el modelado y funcionamiento de la herramienta utilizada para la elaboración del trabajo, haciendo una descripción detallada de cada uno de sus componentes, y la necesidad de su operación en conjunto.

- Capítulo 4: Resultados.

Se describirán las distintas fases realizadas a lo largo del trabajo, viendo los problemas planteados, así como los resultados obtenidos de cada una de ellas.

- Capítulo 5: Conclusiones.

Se expondrán todas las conclusiones alcanzadas tras el análisis de resultados.

Capítulo 2

LTE

En este segundo capítulo se van a explicar las características más importantes de LTE. Para comenzar, se hará una breve introducción sobre dicha tecnología, comentando su aparición en el mundo de los sistemas móviles, así como su situación actual y sus perspectivas de futuro. Seguidamente en la segunda parte del capítulo, se tratarán los conceptos más relevantes de LTE, con el fin de comprender mejor el objetivo y desarrollo de este proyecto.

2.1. Introducción

LTE (Long Term Evolution), comúnmente llamado 4G, es un estándar del 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ¹ iniciado en 2004 con el propósito de proveer una nueva tecnología de acceso radio centrada únicamente en la conmutación de paquetes, “All IP”.

2.1.1. Evolución de los sistemas móviles hasta LTE

Las comunicaciones móviles han pasado de ser una tecnología al alcance de unos pocos afortunados, a ser usadas por una gran mayoría de personas en el mundo. Desde los primeros experimentos de Guglielmo Marconi a finales del siglo XIX, hasta el día de hoy, el mundo de las comunicaciones móviles ha experimentado un gran avance, pasando por diferentes niveles, desde la primera generación (1G), hasta la cuarta (4G), con perspectivas de llegar a la 5G hacia el 2020.

La primera generación de las comunicaciones móviles comenzó a principios de los 80s, con el desarrollo de los sistemas celulares analógicos. Cada país desarrolló su propio sistema, algunos más relevantes, como NMT (Nordic Mobile Telephone) en los países Nórdicos, AMPS (Advanced Mobile Phone

¹Está formado por la unión de siete organizaciones de telecomunicaciones dedicadas al desarrollo de estándares. Tiene como objetivo asentar las especificaciones de un sistema global de comunicaciones, abarcando las tecnologías celulares de redes de telecomunicaciones, incluyendo el acceso radio, la red de transporte del núcleo y las capacidades de servicio [1]

System) en Norte América, TACS (Total Access Communications System) en Europa o J-TACS (Japan Total Access Communications System) en Japón. Se trataba de un sistema únicamente para voz, caracterizado por una baja calidad de enlace, capacidad y velocidad.

Con la llegada de la tecnología digital, surgió la segunda generación (2G) en los 90s. Los sistemas más utilizados fueron GSM (Global System for Mobile Communications), US-TDMA y PDC (Personal Digital Cellular), basados en TDMA (Time- Division Multiple Access). Su despliegue supuso un aumento en la capacidad y la calidad del servicio, ofreciendo además de la voz, la posibilidad de suministrar servicios de datos como fax y SMS (Short Message Service).

En la segunda mitad de los 90s, apareció la tecnología llamada 2.5G, permitiendo la transmisión de datos a mayor velocidad, el intercambio de imágenes y la posibilidad de navegar por internet, gracias a la implantación de GPRS (General Packet Radio System) en GSM. Dio así comienzo el desarrollo de aplicaciones de paquetes sobre datos en entornos móviles.

Con la llegada de la tercera generación (3G), surgió la ocasión de crear una gran cantidad de nuevos servicios, enfocados más allá de la voz, utilizando la conmutación de paquetes para la transmisión de datos, además de soportar mayores velocidades (hasta 2 Mbps en las mejores condiciones).

En 2004, el 3GPP comenzó a estudiar la evolución de la red 3G a la cuarta generación (4G), para dar respuesta al desarrollo de nuevos servicios móviles y de la tecnología correspondiente. El enlace está marcado por la tecnología LTE, precursora de las redes 4G. Las especificaciones del interfaz radio LTE y las de su capa física, se aprobaron en 2007 y 2008, respectivamente, pudiéndose considerar que LTE es una tecnología plenamente operativa desde diciembre de 2009. Sus principales objetivos fueron alcanzar elevadas eficiencias espectrales (5 bits/s/Hz en el enlace descendente, y la mitad en el ascendente) y flexibilidad en la asignación de frecuencias; además se fijaron 100 Mbps para el enlace descendente, 50 Mbps para el ascendente y 20 MHz de ancho de banda [2].

Debido al rápido desarrollo de las tecnologías inalámbricas y a la convergencia de las normas, se espera a medio plazo la aparición de la quinta generación (5G), proporcionando una mayor capacidad para satisfacer la demanda de los usuarios. Las características de esta tecnología aún no están fijadas, pero se prevé que se proporcione un caudal uniforme de al menos 1 Gbit/s, con un máximo cercano a los 10 Gbit/s y un par de milisegundos de latencia. Se espera que las distintas tecnologías se complementen entre sí para alcanzar el objetivo común de proporcionar un servicio ubicuo, a través de las redes móviles de la 5G [3].

2.1.2. Actualidad LTE

En el año 2011 el 3GPP lanzó la release 10 (LTE Advanced, LTE-A) incorporando una serie de mejoras que permitían elevar las tasas de datos



Figura 2.1: Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles

máximas, con aspectos que se verán posteriormente en la sección 2.2, tales como configuraciones multiantena MIMO mejoradas o la introducción de estrategias coordinadas de transmisión/recepción multipunto entre nodos de la red (CoMP, Coordinated multipoint transmission/reception). En la actualidad se ha publicado el release 11 de LTE, que ha introducido aún más avances tecnológicos.

En términos de implantación en el mercado de las telecomunicaciones, se han acordado compromisos firmes para el despliegue de LTE en 150 países, a través de 497 operadores, existiendo ya 367 redes en 121 países. La mayoría, cuentan con un esquema FDD, siendo el espectro más utilizado el de 1800 Mhz (124 operadores en 64 países). Las siguientes bandas más utilizadas son las de 2.6 Ghz y 800 Mhz. Además, se estima que a finales del año 2015 haya mil millones de suscripciones de LTE, un notable aumento frente a los 206 millones que tenía esta tecnología a finales del año 2013. Respecto al despliegue de LTE-Advanced, también está cobrando velocidad, contando actualmente con 54 redes en 35 países.

Las suscripciones de LTE representan el 40 % del total en América del Norte (considerada la región líder mundial en LTE), seguida por Europa Occidental, como el segundo mercado regional del mundo, con casi el 13 % y Asia, con el 10 % [4].

Si se analiza la implantación de esta tecnología, más concretamente en España, 3 operadores, Movistar, Vodafone y Orange comenzaron a ofrecer servicios 4G LTE en el año 2013, utilizando las bandas de 1800 MHz y 2600 MHz. La Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) también había autorizado en España la banda de 800 Mhz, la cual presenta menos pérdidas de propagación, ahorrando en recursos, lo que la hace más adecuada. Sin embargo esta banda se encontraba ocupada por la televisión digital terrestre (TDT), que finalmente en 2015, debido a un dictamen de la Unión Europea, fue desocupada. Aunque en la actualidad dicha banda se encuentra libre, las tres grandes operadoras han confirmado que no operarán en ella hasta otoño de 2015.

2.1.3. Futuro LTE

Como se ha detallado en la sección anterior, actualmente se encuentra disponible el LTE release 10, más conocido como LTE-Advanced, el cual proviene de LTE release 8, y que ya ha evolucionado al LTE release 11. Sin embargo estas actualizaciones no terminan aquí. El tráfico en las redes de comunicaciones móviles, ha crecido exponencialmente en los últimos años y se espera que lo siga haciendo en el futuro, con un incremento de tráfico entre 2012 y 2018.

De esta forma, en la reunión “Release 12 and beyond”, que tuvo lugar en 2012, se resaltó la importancia de incluir una evolución no sólo a la hora de buscar el incremento de capacidad o la mejora de la experiencia para el usuario final, sino también teniendo en cuenta aspectos como la reducción de costes o un mejor soporte para aplicaciones. Las principales áreas tecnológicas tratadas para este release fueron las siguientes:

- Mejora de los accesos de área local.
- Ampliación de las transmisiones multi-antena/multi-punto.
- Mejora del soporte para la comunicación de tipo máquina (MTC).
- Soporte para la comunicación directa device-to-device.

Es importante destacar que LTE-Advanced es la evolución de LTE, no un sistema nuevo, de manera que los terminales LTE-Advanced deben ser capaces de acceder a las redes desplegadas durante el primer release de LTE, de igual manera que los terminales de este primer release deberán poder acceder a las redes de LTE-Advanced. Esto es fundamental para la introducción paulatina de nuevas funciones de una manera eficiente.

Además, está surgiendo un movimiento en la industria de telecomunicaciones hacia una mayor eficiencia energética, con el fin de reducir las emisiones de CO_2 de las redes LTE durante los próximos años. Este movimiento, conocido como “green network”, ya ha avanzado desde el centro de datos, donde nació como un medio para reducir costes, a las redes privadas y públicas.

2.2. Características LTE

Una vez explicado el inicio de las redes LTE, así como su evolución y situación actual, se pasa a abordar algunos de los aspectos más importantes que caracterizan esta tecnología, como son su elevada tasa de datos, el uso de OFDM y técnicas MIMO o CoMP, así como su modelo de propagación. Para la realización de este trabajo sólo se ha estudiado el enlace downlink, por lo que las características que se van a describir durante este apartado están más enfocadas en dicha dirección.

2.2.1. Tasas de datos

Para establecer la tasa de datos en LTE, es necesario emplear la fórmula teórica de la capacidad de Shannon, la cual, en función de la SNR, se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_{max}(bits/s/Hz) = \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

Analizando la ecuación 2.1, se observa la complejidad a la hora de definir una expresión general, para determinar la tasa de datos máxima de un canal de comunicación. Sin embargo, con el fin de estudiar las diferentes maneras de aumentar dicha tasa, se puede analizar un caso particular, en el cual el canal sólo se ve afectado por ruido blanco gaussiano (AWGN), de este modo la capacidad C puede definirse mediante la siguiente ecuación 2.3.

$$C = BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2)$$

Siendo:

- BW ancho de banda disponible para la comunicación.
- S potencia de la señal recibida.
- N potencia ruido blanco

Examinando la expresión, se observa que hay dos factores que limitan la capacidad, la relación señal a ruido y el ancho de banda. Así, existen diferentes opciones para aumentar la tasa de datos, en escenarios limitados tanto por ruido como por interferencia.

Una de ellas consiste en reducir la distancia entre transmisor y receptor, minimizando de esta manera la atenuación de la señal. Otro estrategia para aumentar la señal recibida, es el uso de múltiples antenas en recepción, lo que se conoce como diversidad, que proporciona un incremento de la SNR para una distancia, a través de la combinación de la señal recibida por diferentes antenas (SIMO). También se incrementa la señal recibida si las antenas adicionales se colocan en el lado del transmisor (MISO). Sin embargo, dichas técnicas sólo son viables hasta cierto punto, a partir del cual se produce una saturación en la tasa de datos alcanzable. Dicho problema se puede solucionar mediante el uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción (MIMO), dando lugar a la multiplexación espacial, técnica que se explicará posteriormente en el apartado 2.2.3.

Estas posibles soluciones sirven, en escenarios limitados por interferencia o por ruido; sin embargo, hay que tener en cuenta la diferencia entre estos dos factores, y es que la interferencia tiene una estructura que la vuelve predecible, al contrario del ruido [6] .

2.2.2. Esquema de transmisión

Para entender los motivos por la que LTE usa OFDM como esquema de transmisión, es necesario definir previamente los conceptos de propagación multicamino y transmisión multiportadora.

Un problema presente en la transmisión de banda ancha, es la contaminación de la señal transmitida debido a la dispersión en el canal radio. Este proceso se da cuando en la antena receptora llegan diferentes versiones retrasadas de la señal transmitida, como se puede observar en la Figura 2.2. Esta dispersión temporal genera una respuesta no constante en el dominio de la frecuencia, lo que causa una serie de desvanecimientos selectivos en frecuencia, provocando la ISI (intefrencia entre símbolos).

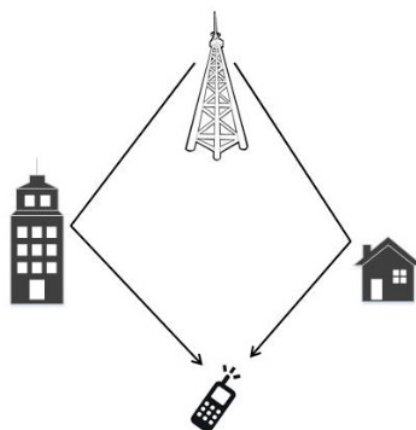


Figura 2.2: Propagación multicamino

Estos desvanecimientos dependen principalmente de dos factores:

- El ancho de banda de la señal transmitida (el impacto habitualmente mayor en transmisiones de banda ancha)
- El entorno por el que se propaga la señal (la dispersión temporal será menor en celdas pequeñas, en entornos con pocos obstáculos)

De este modo, para poder aumentar el ancho de banda de transmisión, sin corromper la señal debido a los desvanecimientos, se hace uso de la Transmisión Multiportadora, que propone la transmisión de múltiples señales de banda estrecha, normalmente llamadas subportadoras, multiplexadas en frecuencia y transmitidas hacia el mismo receptor, sobre un mismo enlace radio, como se puede observar en la figura 2.3.

Mientras una simple transmisión multiportadora contiene unas pocas subportadoras, en OFDM se transmite un gran número de ellas. De esta manera se consigue una alta robustez frente a canales selectivos, haciendo que el tiempo de símbolo sea mayor que el retardo de propagación de canal, reduciendo así, o incluso eliminando, la interferencia entre símbolos.

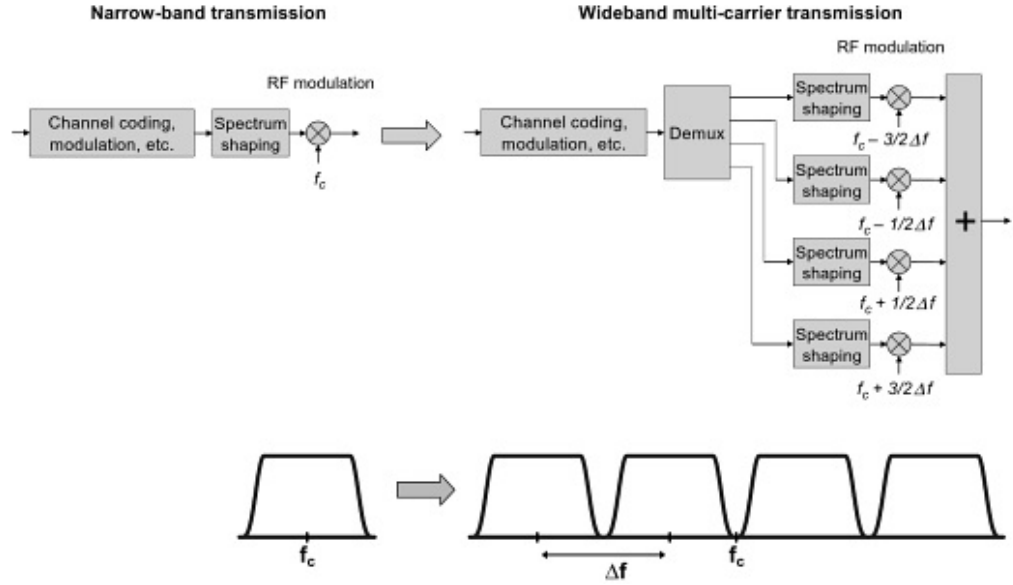


Figura 2.3: Transmisión Multiportadora [6]

Este hecho es posible gracias a la introducción de un prefijo cíclico (CP), copia de la última parte del símbolo OFDM anterior. Además, permite una implementación de baja complejidad a través del uso de la transformada rápida de Fourier (FFT), ofreciendo flexibilidad de espectro, lo que facilita una evolución fluida de las tecnologías de acceso de radio ya existentes, hacia LTE.

En OFDM, cada subportadora es ortogonal al resto. Esto se consigue haciendo coincidir el máximo de amplitud del espectro de una subportadora, con los ceros de las otras, evitando así la interferencia entre ellas, como se muestra en la Figura 2.4 [8].

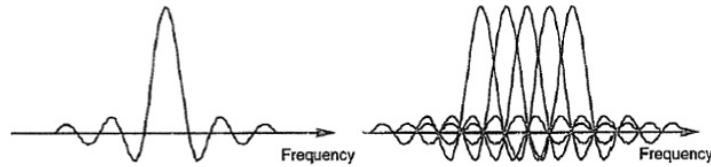


Figura 2.4: Espectro de una subportadora OFDM y de una señal OFDM

Un resource element puede definirse como una subportadora durante un símbolo OFDM, y se agrupan en resource blocks, como se muestra en la Figura 3.3. Cada uno está formado por 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia, con una duración de 0.5 ms por ranura en el dominio del tiempo. De esta forma, cada resource block contiene $7 \cdot 12 = 84$ resource elements.

En el modo FDD de LTE para el downlink, cada símbolo OFDM es transmitido en subportadoras de 15 o 7.5 kHz; cada subtrama posee una

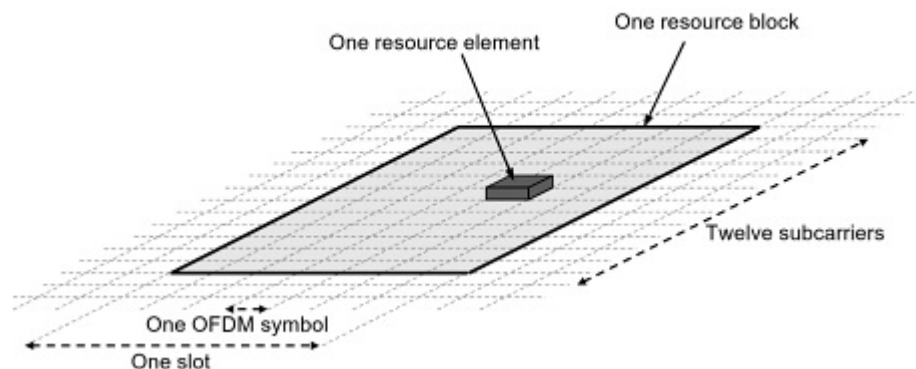


Figura 2.5: Recursos físicos LTE en tiempo y frecuencia [6]

duración de 1 ms, dos ranuras de 0.5 ms cada una, como se ha mencionado anteriormente. Además contiene varios símbolos OFDM consecutivos (14 y 12 para los modos de 15 y 7.5 kHz, respectivamente). Atendiendo a los 15 KHz que ocupa la subportadora se obtienen 105 símbolos, como se expresa en la siguiente ecuación

$$15 \cdot 7 = 105 \text{ Símbolos} \quad (2.3)$$

Por tanto, dependiendo de los servicios que un usuario consuma, es decir, la capacidad requerida, se le asignará un determinado número de resource blocks, que aumentarán a medida que mayor sea la capacidad contratada.

En el enlace ascendente se utiliza SC-FDMA, que es una técnica similar a OFDM, con la diferencia de que se aplica una FFT inicial, antes de la modulación OFDM. Con esto se consigue reducir el pico de relación de potencia media, disminuyendo así el consumo energético en los terminales de usuario.

OFDM también puede considerarse como un esquema de multiplexación de usuarios o de acceso múltiple (OFDMA), ya que permite, para frecuencias simultáneas, transmisiones separadas hacia o desde múltiples terminales. En la dirección downlink, en cada intervalo de símbolo OFDM, varios subconjuntos del conjunto global de subportadoras disponibles se usan en la transmisión a diferentes terminales (ver 2.6). Además de permitir el uso de subportadoras consecutivas para la transmisión, también se contempla la distribución de las subportadoras en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en la Figura 2.7.

2.2.3. Técnicas MIMO

Otro aspecto a resaltar de LTE es el uso de las técnicas multi-antena para mejorar el rendimiento del sistema, su cobertura y capacidad. Estas mejoras son debidas a la diversidad proporcionada; sin embargo, como ya

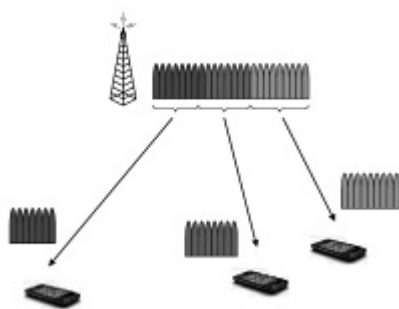


Figura 2.6: Esquema multiplexación de usuarios de LTE

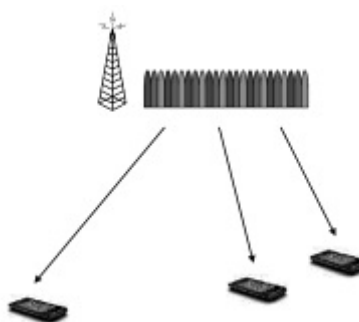


Figura 2.7: Esquema OFDMA de LTE

se ha explicado en la sección 2.2.1, llega un punto en el que las tasas de datos se saturan y no se consigue un incremento adicional. Para solucionar este problema, se emplea un tipo en concreto de las técnicas multi-antena, conocido como técnica de multiplexación espacial MIMO, que evita dicha saturación, consiguiendo así un aumento en la capacidad.

La multiplexación espacial, implica la transmisión de múltiples capas; esto es, transmisiones paralelas en el tiempo y frecuencia, hacia un mismo terminal. Se crean L trayectos paralelos, desacoplados entre sí, de manera que se obtiene una ganancia en eficiencia espectral que coincide con el número de caminos independientes L . De esta forma, el uso de múltiples antenas, tanto en el transmisor como en el receptor, combinado a su vez con el procesamiento de señales, permite minimizar la interferencia entre diferentes capas [6].

Las técnicas MIMO proporcionan además mejoras en la capacidad de las células y en el rendimiento, beneficiándose así los usuarios que posean una buena condición de canal, del uso de múltiples corrientes de transmisión. De la misma manera, los usuarios más débiles del sistema también pueden verse beneficiados por las ganancias del beamforming², proporcionadas por señales de las múltiples antenas.

De esta forma, queda clara la importancia del papel que juegan las técnicas MIMO, aumentando la tasa de datos en LTE. En la dirección downlink de LTE puede haber 1, 2 ó 4 antenas transmitiendo en la estación base y 1, 2 ó 4 antenas receptoras en el terminal de usuario consiguiendo así diversidad adicional en transmisión o recepción. Por su parte en el uplink se limita el número de antenas transmisoras en el terminal de usuario a 1, por lo que en este caso, sólo se puede obtener diversidad en recepción [7].

²Una transmisión beamforming permite a un punto de acceso, a través del uso de técnicas de procesamiento de señal, concentrar su energía en la dirección del receptor de destino.

2.2.4. Técnicas CoMP

Debido a la interferencia causada por el reuso espacial, las primeras tecnologías celulares, establecían una separación frecuencial entre células contiguas con el fin de limitar esa interferencia. Sin embargo, limitar el espectro total en una transmisión, reduce el máximo ancho de banda alcanzable, disminuyendo de esta manera las máximas tasas de transmisión disponibles. Al tratarse de una tecnología que debe ser capaz de transmitir altas tasas de datos, LTE no puede permitirse esta estrategia. Para maximizar la eficiencia del sistema y obtener las mayores tasas de datos en el usuario. Así, es necesario que todos los recursos frecuenciales estén disponibles. En este escenario surge el concepto de coordinación entre los diferentes puntos de la red, con la finalidad de obtener un mejor control de los niveles de interferencia.

A pesar de que fue durante el desarrollo del LTE release 10 cuando surgió la posibilidad de una mayor coordinación dinámica entre distintos puntos de la red, no fue hasta el release 11, cuando se introdujeron las principales características de CoMP (Coordinated Multi-Point), destacando los siguientes aspectos:

- Una mejor utilización de la red, pues al existir conexiones a varias estaciones base a la vez, los datos pueden ser transmitidos por menos cargadas, consiguiendo una mejor utilización de los recursos.
- Una mejora en el rendimiento de recepción. Al disponer de varias estaciones base para una conexión, el número de llamadas rechazadas disminuye.
- Debido a la recepción conjunta de varias estaciones base se incrementa la calidad de señal recibida.
- Una reducción de la interferencia, debido a la utilización de técnicas de combinación que hacen posible utilizarla de manera constructiva.

Para el caso del downlink, las técnicas CoMP pueden entenderse como una estrategia de transmisión cooperativa. El canal de cooperación puede ser como un canal de emisión MIMO multiusuario, con información amplia sobre el rendimiento teórico disponible [9]. Estas técnicas pueden ser divididas según dos enfoques diferenciados:

- Multi-point coordination. Referido a esquemas en los cuales la transmisión es gestionada desde un punto específico, pero en los que existe una coordinación entre distintos transmisores.
- Multi-point transmission. Referido a esquemas en los cuales la transmisión se produce desde diferentes puntos de transmisión a un único terminal.

Este trabajo sigue las pautas del segundo enfoque, multi-point transmission. En él aparecen dos maneras para transmitir la información. Desde un único punto de transmisión, pudiendo cambiar el mismo de una forma dinámica entre varios elementos, técnica que recibe el nombre de Dynamic Point Selection (DPS), la cual se ilustra en la Figura 2.8; por otro lado también se puede gestionar la transmisión de forma conjunta desde múltiples puntos a un único terminal, esquema denominado Joint Transmission (JT), ver Figura 2.9.



Figura 2.8: Esquema DPS

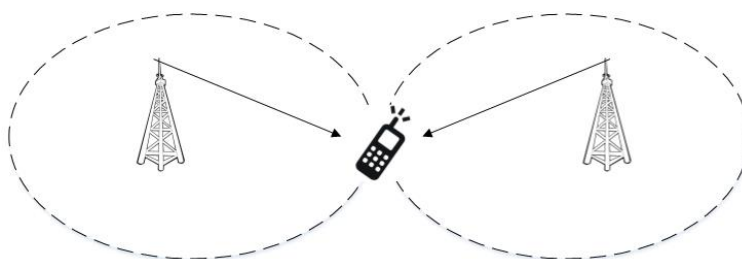


Figura 2.9: Esquema JT

Las ventajas en el caso de la DPS, es que los requisitos para la coordinación de la red son menores que en el caso del JT, debido principalmente a dos razones. La primera que los datos no se transmiten necesariamente desde múltiples estaciones base; además la coordinación se limita a la planificación y las características de los haces.

En este caso, se ha elaborado el proyecto con la técnica de Joint Transmission. En la cual, se distinguen dos perspectivas. La primera se da cuando en una transmisión conjunta se asume que la red tiene los conocimientos necesarios sobre los canales que se utilizan, de forma que sea posible controlar y seleccionar las transmisiones según determinados criterios; esa transmisión recibe el nombre de transmisión conjunta coherente. Actualmente no hay soporte en las especificaciones de LTE para que el terminal pueda enviar la información necesaria.

Si por el contrario se asume que la red no tiene ningún conocimiento acerca de los canales, se estaría ante una transmisión no coherente. En este caso el principal objetivo es conseguir cierta ganancia de potencia, en

función de mejorar la transmisión a otros terminales y de en medida en que se generan interferencias con otras transmisiones.

2.2.5. Sectorización

El área de cobertura de una estación base carece de una forma determinada; por eso, en el inicio de los sistemas móviles, se necesitó aproximar por una forma geométrica regular, para poder analizar su rendimiento. Si se cuenta con una antena omnidireccional, la aproximación inmediata de su patrón de radiación sería la de un círculo, aunque, se generarían solapamientos al teselar un terreno, como se muestra en la Figura 2.10. Por tanto se optó por emplear el hexágono regular, como puede observarse en la Figura 2.11. El área cubierta por una estación base, recibe el nombre de célula.

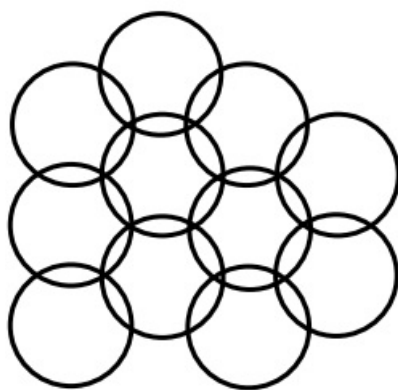


Figura 2.10: Área cubierta con círculos

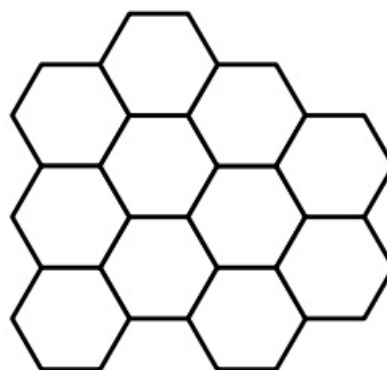


Figura 2.11: Área cubierta con hexágonos

Partiendo de este sistema celular, con el objetivo de reducir las señales interferentes, se emplea la sectorización, que es una técnica ampliamente utilizada para aumentar la capacidad en las redes celulares inalámbricas. Mediante la utilización de filtrado espacial, se produce un aislamiento entre sectores angulares, que puede ser lo suficientemente elevado como para permitir el uso del mismo recurso radio (tiempo, frecuencia y código), en diferentes sectores. Lo más habitual es utilizar configuraciones de 3 sectores (120°), aunque en ciertas áreas de mucho tráfico se podrían emplear 6 sectores (60°).

Sin embargo, al sectorizar aparecen también ciertas desventajas:

- Aumenta el número de antenas por estación base.
- Aumenta el número de traspasos o handovers, al reducirse el tamaño de las células.
- Desde el punto de vista de los operadores, al reducir el número de canales por célula, disminuye también la capacidad y/o eficiencia del sistema.

La sectorización, aunque no es una característica únicamente propia de LTE, ha sido empleada para la realización de este trabajo.

2.2.6. Modelos de propagación

Tras haber visto como se define de forma hexágona el área de cobertura de una estación base, durante esta sección se van a abordar los modelos de propagación para LTE asumiendo células hexagonales.

La fórmula general para obtener la potencia recibida se expresa en la ecuación 2.4.

$$Potencia_{Rx} = Potencia_{tx} - \text{Max}(P_L - G_{tx} - G_{rx}, MCL) \quad (2.4)$$

Los parámetros que aparecen en la ecuación se definen de la siguiente manera:

- P_L pathloss, calculado a partir de σ (dependiente del escenario) y de L (pérdidas de propagación). El pathloss puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación: $PL = L + \sigma$
- MCL (Minimum Coupling Losses) son las pérdidas por acoplamiento, que pueden tomar los valores que se recogen en la Tabla 2.3
- G_{tx} Ganancia de la antena de transmisión
- G_{rx} Ganancia de la antena receptor

Durante la propagación de una señal, se producen pérdidas, llamadas pérdidas de propagación; esto es, hay cierta potencia de señal que se pierde al atravesar el espacio entre dos puntos. Su valor concreto depende de diferentes factores, como la altura a la que se encuentran las antenas (a mayor altura, menos obstáculos) o la distancia entre ellas, pero el factor más influyente en estas pérdidas es el área en que se transmite la señal, que se corresponde habitualmente con 3 escenarios diferentes, área urbana, suburbana o rural.

En zonas urbanas el tráfico en redes celulares es bastante alto, siendo la velocidad de los usuarios menor que en otros escenarios, siendo incluso inexistente en algunos casos. Además, en las zonas urbanas hay muchos edificios y obstáculos, lo que afecta a la propagación de las señales.

Sin embargo, en zonas rurales, el tráfico es menor, mientras que la velocidad de los usuarios suele ser mayor que en el caso anterior.

Teniendo en cuenta estos factores, en la Tabla 2.1 se muestran las expresiones para calcular el pathloss (pérdida por propagación), dependiendo de si se encuentra en línea de vista (LOS) o no (NLOS), además de la desviación estándar para cada caso. En este trabajo sólo se han tenido en cuenta escenarios urbanos y con antenas macro, por lo que dicha tabla sólo recoge las fórmulas de dicha zona. Estos modelos se pueden aplicar en la gama de frecuencias de 2 - 6 GHz y para diferentes alturas de antena. Se debe

Tabla 2.1: Modelo de propagación

ESCENARIO		PL[dB]	SHADOW FADING STD[dB]	DEFAULT VALUES
URBAN MACRO (UMa)	LOS	$PL = 22,0 \cdot \log_{10}(d) + 28,0 + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < d'_{BP}$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1.5m$
		$PL = 40 \cdot \log_{10}(d_1) + 7,8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < 5000m$ $h_{BS} = 25m,$ $h_{UT} = 1.5m$
	NLOS	$PL = 161,04 - 7,1 \cdot \log_{10}(W) + 7,5 \cdot \log_{10}(h) - (24,37 - 3,7(h/h_{BS})^2) \cdot \log_{10}(h_{BS}) + (43,42 - 3,1 \cdot \log_{10}(h_{BS})) \cdot (\log_{10}(d) - 3) + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c) - (3,2 \cdot (\log_{10}(11,75 \cdot h_{UT}))^2 - 4,97)$	$\sigma = 6$	$10m < d < 5000m$ $h = \text{avg.buildingheight}$ $W = \text{street width}$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1,5m,$ $W = 20m, h = 20m$ <i>The applicability ranges :</i> $5m < h < 50m$ $5m < W < 50m$ $10m < h_{BS} < 150m$ $1m < h_{UT} < 10m$

Tabla 2.2: Probabilidad de LOS

ESCENARIO	PROBABILIDAD DE LOS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA d[m]
UMi	$P_{LOS} = \min(18/d, 1) \cdot (1 - \exp(-d/36)) + \exp(-d/36)$
Uma	$P_{LOS} = \min(18/d, 1) \cdot (1 - \exp(-d/63)) + \exp(-d/63)$

tener en cuenta que la distribución de los desvanecimientos por shadowing es log-normal.

Donde:

- h'_{BS} altura efectiva de la antena. Calculada del siguiente modo $h'_{BS} = h_{BS} - 1m$.
- h'_{UT} altura efectiva de la antena. Calculada del siguiente modo $h'_{UT} = h_{UT} - 1m$
- d'_{BP} distancia de ruptura para un caso LOS. Se calcula a partir de f (frecuencia central en Herzios), c (velocidad de propagación de la luz en el espacio libre $c = 3 \cdot 10^8 m/s$), h'_{BS} y h'_{UT} , quedando de la siguiente manera

$$d'_{BP} = 4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot f \cdot c$$

En la Tabla 2.2 aparecen las expresiones para calcular la probabilidad de encontrarse en línea de vista.

En la Tabla 2.3 se muestran finalmente los posibles valores para las pérdidas por acoplamiento, según la zona en la que se propague la señal.

Tabla 2.3: Pérdidas por acoplamiento (MCL)

	MACRO	MICRO	PICO	FEMTO
MCL	$\geq 70\text{dB}$ (URBAN) / $\geq 80\text{dB}$ (RURAL)	$\geq 53\text{dB}$	$\geq 45\text{dB}$	\sim

Capítulo 3

Herramienta

En este capítulo se va a explicar el funcionamiento de la herramienta utilizada para la realización de este proyecto, describiendo las distintas partes de las que se compone.

Permite el despliegue y análisis de escenarios LTE y su simulación, utilizando el lenguaje C++. A su núcleo central se le han ido añadiendo distintas clases, para integrar la funcionalidad necesaria en el ámbito de este trabajo. Así, se analiza el uso de las técnicas CoMP, como ya se ha explicado anteriormente, con el fin de estudiar la influencia de dichas técnicas en lo que a ahorro energético y disminución de interferencia se refiere.

En cuanto a la composición de la herramienta, puede dividirse en los componentes principales que se mencionan a continuación, y que se describirá más detalladamente en los siguientes apartados de este capítulo.

- Un núcleo como base.
- Unas trazas, archivos de configuración y escenarios.
- Clases que se incorporan para dotarle de funcionalidades adicionales..

3.1. Núcleo

El núcleo de la herramienta está formado por tres componentes distintos: usuarios, elementos de acceso y servicios. Cada uno de ellos posee unos Tipos y unos Parámetros. La principal diferencia entre estos dos conceptos es que los Tipos son fijos y no varían durante las iteraciones de una simulación. En el caso contrario se encuentran los Parámetros, que podrían variar en cada iteración, como se detallará más adelante. Además de tener Tipos y Parámetros, los usuarios y los elementos de acceso se encuentran guardados en contenedores, para su posterior despliegue, mientras que los servicios son creados para cada usuario y están previamente definidos en el archivo de configuración.

Para entender mejor en qué consisten estos componentes, se detalla a continuación la información que se guarda tanto en los Parámetros como en los Tipos de cada uno de ellos.

■ Tipos:

- Usuarios. Contiene el número máximo de estaciones base a los que se puede conectar el usuario, la ganancia de recepción, los servicios que emplea y la figura de ruido.
- Elementos de acceso. Se guardan los valores con los que trabaja la estación base, como son la potencia de transmisión, la frecuencia, la capacidad, tipo (macro, pico...), la ganancia de transmisión, el número de sectores y el azimut¹.
- Servicios. Almacena el nombre del servicio y la capacidad que requiere.

■ Parámetros:

- Usuarios. Contiene información sobre las potencias que recibe el usuario, así como las estadísticas del propio usuario que se van obteniendo, como la SINR, la eficiencia espectral, el número de resource blocks y la potencia final empleada para cada usuario.
- Elementos de acceso. Obtiene información del Tipo sobre las alturas, la capacidad inicial y el número de sectores de la estación base. Además almacena información de cada sector, los usuarios a los que da recursos y cuántos, para saber si puede aceptar más o no.
- Servicios. Guarda información acerca de la intención del usuario, si se pretende acceder a la red o no.

Hay que resaltar que en este trabajo el modelo está planteado con sectores, que se van a tratar como si cada uno fuera una antena diferente. En los Tipos y Parámetros se almacena la información de la estaciones base con los 3 sectores; es decir, los sectores que perteneces a una misma estación comparten estos archivos, pero cuando se realizan los cálculos, se tratan como si fueran antenas independientes, cada uno con su potencia de transmisión.

3.2. Trazas, archivos de configuración y escenarios

En esta sección van a detallarse otros elementos de los que consta la herramienta, así como explicar su funcionamiento en combinación con las que acaban de ser detalladas en el apartado anterior.

¹Punto exacto en el que se fija la antena en el plano horizontal. Este ángulo se mide desde el norte geográfico en sentido de las agujas del reloj.

En los archivos de configuración, como ya se ha mencionado, se guarda la información relativa a los servicios, pero además contienen datos sobre las antenas y usuarios, con los que se configuran los Tipos. En estos archivos se especifica el número de usuarios y las características de cada clase de usuario, como el número de antenas máximas a las que se puede conectar, o los servicios que está utilizando. Se especifica también la capacidad de los servicios existentes o el tipo de antenas utilizadas, con su correspondiente potencia de transmisión, su capacidad, o el número de sectores. Además, aparece también el tipo de escenario que se utiliza (macro en este caso). Otro dato a resaltar, es el tiempo de snapshot, duración de cada iteración, así como el tiempo total. Estos valores determinan, el número total de iteraciones.

En cuanto a las trazas, existen las de usuario y las de estación base. En las de usuario se proporciona información relativa al identificador de usuario, posición, tipo y si el servicio está activo o no. Estas van cambiando con cada iteración. Por otro lado las trazas de las estaciones base en las que, aparece el identificador de la estación, la posición y su tipo, son iguales para todas las iteraciones.

Para entender un poco mejor el funcionamiento de los elementos definidos hasta ahora, se puede observar la Figura 3.1. En ella se representa como en primer lugar, se constituye la red, los usuarios, estaciones base y los servicios a través de los archivos de configuración. Posteriormente, se empieza a iterar. En la primera iteración se hace un despliegue de estaciones base y usuarios, y se crean los servicios, a través de la información proporcionada anteriormente. Además se hará uso también de la información de las trazas para saber su posición. A continuación se procede a hacer el análisis del escenario propuesto. En las siguientes iteraciones ya no hace falta la información de los archivos de configuración utilizando, únicamente las trazas para cambiar de posición y mirar la intención del servicio, esto es si el usuario quiere acceder a la red o no. Una vez hechas todas las iteraciones se procederá al análisis de los resultados obtenidos.

En cuanto al escenario, en él se definen las clases que interesa ejecutar en la simulación, ya que a partir de ellas, se consiguen los resultados requeridos. Además, en el escenario también se define su tamaño, para saber cuál es la superficie en la que el usuario debe moverse.

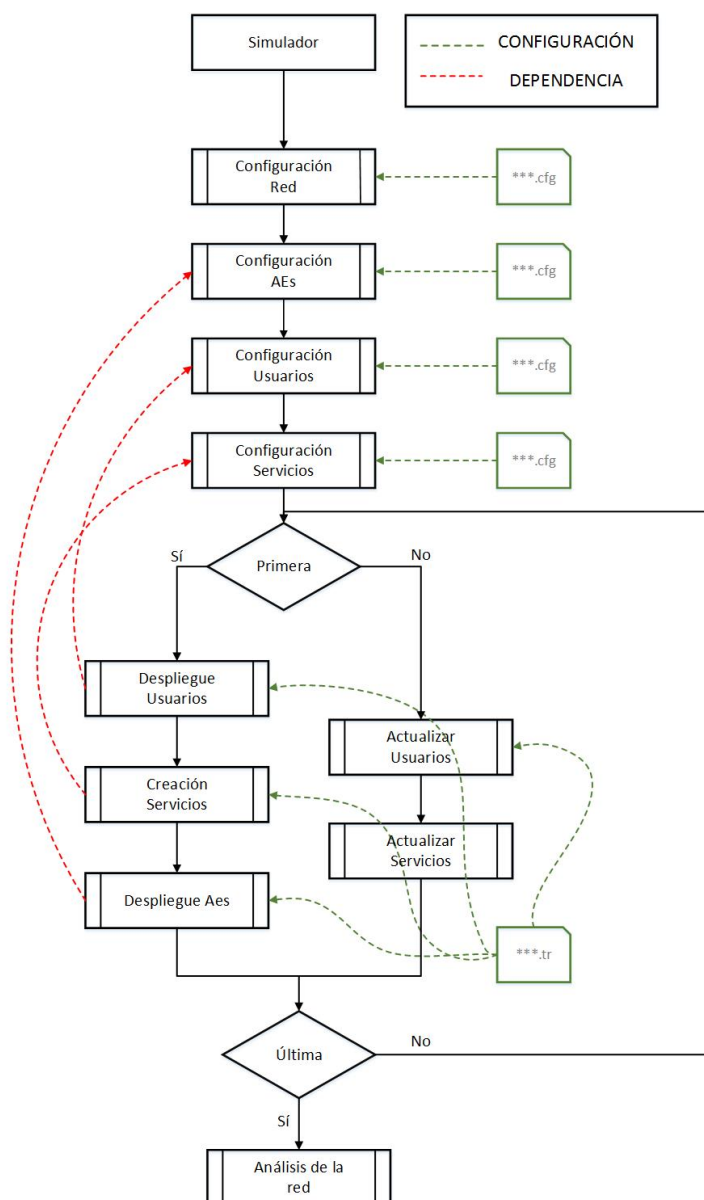


Figura 3.1: Esquema del simulador empleado

3.3. Clases

En esta sección se describen las clases añadidas al núcleo de la herramienta, definidas en los escenarios a analizar. Se explica paso a paso cómo se obtiene la potencia necesaria final por los diferentes sectores, para ofrecer los servicios a los usuarios, así como la implementación de las técnicas CoMP en dichas clases. En la Figura 3.2 se muestran las clases incorporadas al núcleo para lograr el comportamiento deseado.

- Establecimiento de alturas

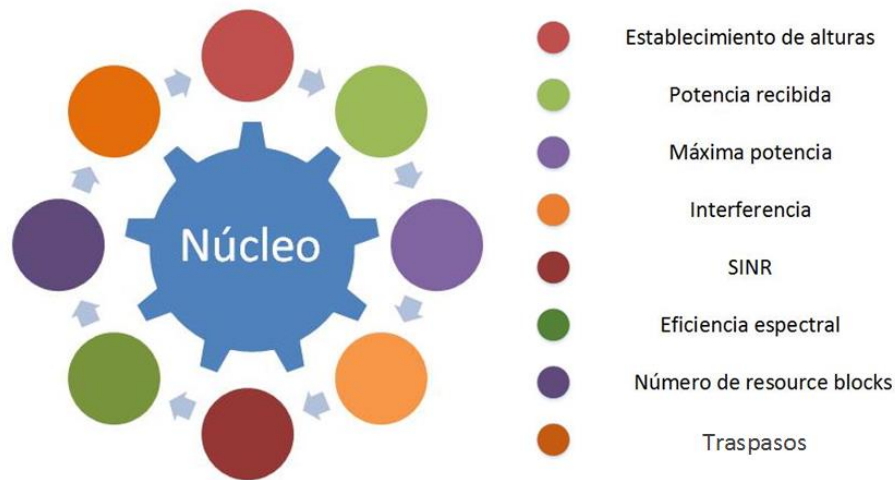


Figura 3.2: Incorporación de clases al núcleo

En primer lugar, se establece la altura a la que se encuentran las antenas. Para ello se recorre el contenedor de antenas y se mira el tipo de la estación base. Si se trata de una MACRO se le asignan 25 m en la altura, registrada en los Parámetros de dicha estación base, si es MICRO, 10 m; y si no se trata de una antena LTE 3 m.

■ Potencia recibida

A continuación se calcula la potencia recibida por los distintos usuarios desplegados en el escenario, desde cada uno de los sectores de las estaciones base presentes en el mismo.

Para hacer el cálculo de esta potencia se utiliza la expresión (2.4), explicada en el capítulo anterior al hablar sobre los modelos de propagación (2.2.6) teniendo en cuenta todo los parámetros descritos. Tanto las ganancias de transmisión y recepción, como la potencia transmitida y el número de sectores, se obtienen del Tipo de la estación base, pues son valores que no cambian durante una simulación. Por otro lado, el pathloss es calculado siguiendo las indicaciones dadas en la Tabla 2.1, vista también en la sección 2.2.6 del capítulo anterior.

De esta forma, se recorren primero los usuarios y para cada uno se itera el contenedor de las estaciones base, teniendo en cuenta los 3 sectores de cada una, calculando el pathloss y la potencia recibida por cada uno; se registran, en un mapa en los Parámetros de cada usuario, el identificador de la antena y del sector así como la potencia recibida de dicho sector.

■ Máxima Potencia

Una vez establecidas todas las potencias recibidas para cada usuario, se determinan cuáles son las potencias más altas recibidas por cada

usuario, pues son a las antenas correspondientes a las que el usuario va a intentar conectarse y, a su vez, se ordenan de mayor a menor todas las potencias que el usuario percibe.

En este punto, se recorre el contenedor de usuarios, identificando del Tipo de cada uno el número máximo de estaciones base a las que se puede conectar. Para cada usuario se recorren todas las estaciones base y sus sectores, comparando todas las potencias, para seleccionar las más altas; finalmente se registran los índices (estación y sector) de las que las emiten en los Parámetros del usuario.

De este modo ya se tienen los sectores de las estaciones base a los que el usuario va a intentar conectarse y la potencia que recibe de ellos.

■ Interferencia

En este paso se calcula la interferencia que va a afectar a la conexión del usuario con cada una de las estaciones base, determinando finalmente la interferencia total.

Para su cálculo se parte de un valor aleatorio comprendido entre 3 y 6 dB, ya que en un entorno real, la interferencia depende de diversos factores que no se pueden establecer en la simulación hasta el final del proceso, una vez estén todos los usuarios y estaciones base conectados.

Además en este caso, debido al uso de las técnicas CoMP, dicha interferencia varía según el número de antenas a las que se conecte el usuario. Así, si el usuario en lugar de conectarse a una antena, se conecta a dos, esa segunda, que previamente estaba interfiriendo, deja de hacerlo, incrementando la potencia recibida. Esta es una de las ventajas principales de las técnicas CoMP.

De esta forma, para el cálculo de la interferencia final, se suman todas las potencias que recibe un usuario de las diferentes estaciones base y se establece el porcentaje de cada una de ellas frente al total. Se elimina, del valor aleatorio inicial, la interferencia que cursarían las estaciones a las que el usuario va a conectarse, si no lo hiciera. Se recorren todas las estaciones con las que el usuario pretende conectarse, aplicando la ecuación 3.1, para obtener dicho valor en cada una de ellas.

$$I_{Antena} = Porcentaje_{Sector} \cdot I_{Aleatoria} \quad (3.1)$$

- I_{Antena} , interferencia producida por una antena.
- $Porcentaje_{Sector}$, porcentaje de potencia recibida del sector al que se va a conectar
- $I_{Aleatoria}$, interferencia inicial aleatoria

Una vez se haya restado a la interferencia inicial, las correspondientes a las antenas a las que el usuario tiene intención de conectarse, se obtiene la interferencia final, que se guarda en los Parámetros de dicho usuario.

■ SINR

Después de obtener las potencias y la interferencia, ya se puede calcular la SINR percibida por cada uno.

Para ello se recorre el contenedor de usuarios y, para cada uno de ellos, se aplica la ecuación 3.2.

$$SINR = \frac{P_{Rx}}{N_0 \cdot Bw_{Rb} + Interferencia} \quad (3.2)$$

En esta expresión los parámetros están definidos de la siguiente manera:

- P_{rx} potencia total recibida, esto es la suma de todas las potencias recibidas de las estaciones base con las que el usuario va a intentar conectarse
- N_0 ruido blanco gaussiano obtenido de la siguiente manera: $N_0 = K \cdot T$. Donde T es la temperatura ambiente $T = 300^\circ$ Kelvin y K es la constante de Boltzmann $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$
- $Bw_{Rb} = 180 \text{ KHz}$, ancho de banda por resource block.
- La interferencia obtenida a partir de los parámetros del usuario, tras el cálculo del paso previo.

Una vez establecido el valor de la SINR, se guarda como una variable en los Parámetros del usuario.

■ Eficiencia espectral

El siguiente paso es el cálculo de la eficiencia espectral, que permite determinar la capacidad de la que se dispone en LTE. Sin embargo, la expresión 2.1 vista en el capítulo anterior, no puede ser utilizada directamente debido a diferentes cuestiones de aplicación, en las que se produce una pérdida de precisión [5]. Con el fin de solventar dicho problema, en el marco de este trabajo se hace uso de la fórmula de Shannon modificada, ecuación 3.3, la cual se ha empleado para la realización de este trabajo:

$$S_{max}(bits/s/Hz) = BW_{eff} \cdot \eta \cdot \log_2 \left(1 + \frac{SINR}{SINR_{eff}} \right) \quad (3.3)$$

El parámetro η es de corrección y es nominalmente igual a uno. A causa de varios factores, como el prefijo cíclico, la relación señal a ruido eficaz ($SINR_{eff}$) o motivos de sobrecarga, la eficiencia de ancho de

banda a nivel de enlace es aproximadamente del 83% , por lo que la constante del ancho de banda eficaz toma dicho valor $BW_{eff} = 0,83$. En el caso de la $SINR_{eff}$ es más difícil de calcular, debido a que la SINR varía por factores como la limitación en el tamaño del bloque de código, los modos de modulación, codificación o técnicas MIMO. Por dichas razones, el valor de esta última constante se extrae a partir del ajuste de las curvas de resultados de simulación a nivel de enlace, obteniendo así aquellos que proporcionan el mejor ajuste a la curva de adaptación de enlace:

- $\eta = 0.9$
- $BW_{eff}=0.83$
- $SINR_{eff}=1.25 \sim 1\text{dB}$
- SINR el valor calculado en el paso anterior, almacenado en los Parámetros del usuario.

En este caso, la eficiencia espectral se ha tenido que limitar a 5 bits por segundo y por herzio, puesto que en condiciones reales, este valor no sería superado. De esta forma, se guarda el valor resultante de la expresión anterior en los Parámetros del usuario, excepto si es mayor que 5, en cuyo caso se almacenaría un este máximo.

■ ResourceBlocks

Cuando ya se ha obtenido la capacidad, se procede a calcular el número de resource blocks que el usuario necesita para satisfacer un determinado servicio.

Se recorre el contenedor de usuario, obteniendo la eficiencia espectral, para aplicar posteriormente la fórmula 3.4.

$$\text{Numero de resource blocks} = \frac{\text{Capacidad total}}{Bw_{Rb} \cdot \text{Eficiencia espectral}} \quad (3.4)$$

En esta expresión se encuentran los siguientes parámetros:

- Capacidad total, requisitos del servicio al que el usuario va a conectarse. En este caso, para limitar la complejidad, se ha establecido que cada usuario sólo pueda cursar un servicio a la vez.
- $Bw_{Rb}=180\text{KHz}$, ancho de banda de cada recurso.
- Eficiencia espectral, calculada en la acción anterior.

Aunque en situaciones reales el número de resource blocks debe ser entero, se permitirá números reales, para favorecer la obtención de estadísticas.

Sin embargo, antes de guardar este número de resource blocks, se requiere analizar si los sectores con los que el usuario pretende conectarse, pueden satisfacer su demanda. Para ello se mira si el servicio está activo o no, a través de la intención definida en las trazas. Si dicha intención es 0, el usuario no se conecta. Cuando es un 1, el usuario intentará conectarse a los sectores de los que más potencia recibe, si tiene recursos libres suficientes para aceptar el servicio. Si todas los sectores a los que se pretende conectar están disponibles, el usuario se conecta a ellos y, finalmente, guarda el número de resource blocks en sus Parámetros. De no ser así, cuando alguno de los sectores seleccionados, no puede aceptarlo, se seleccionará el siguiente sector (ordenados según la potencia recibida) recalculando el número de resource blocks necesarios para conectarse, contando con el nuevo sector y descartando el que le ha rechazado, comprobando si esta nueva combinación de estaciones y sectores pueden aceptarlo. Hará esto hasta que finalmente alguna estación base acepte el servicio. Si el usuario no puede conectarse a ninguna estación base, se cambia su intención a 0. En este caso, aunque en la siguiente traza la intención sea 1, se deberá cambiar a 0, hasta que la traza vuelva a ser 0, caso en el que el usuario no tendrá la intención de acceder a la red. Volverá a intentar conectarse cuando pase de 0 a 1. Este proceso puede verse reflejado en el diagrama de estados de la Figura 3.3.

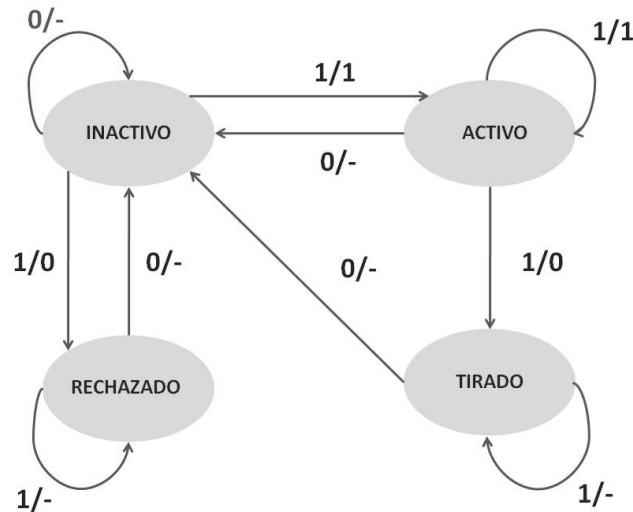


Figura 3.3: Diagrama de estados

El primer valor representa la intención de conectarse que tiene el servicio, mientras que el que el segundo refleja si la conexión ha podido o no.

- Paso de **inactivo a inactivo**, cuando el servicio no tiene intención

de conectarse a la red.

- Paso de **inactivo a activo**, cuando el usuario no está conectado y, teniendo la intención de conectarse a la red, se ha concluido con éxito.
- Paso de **inactivo a rechazado**, cuando el usuario no está conectado y tiene intención de conectarse a la red, pero la conexión se rechaza. En este caso la intención se mantiene a 0, hasta que la intención real pase de nuevo por 0 y 1, reflejando el comienzo de una nueva llamada.
- Paso de **activo a activo**, cuando el usuario está conectado y mantiene la intención, y la conexión se sigue aceptando por la red.
- Paso de **activo a inactivo**, cuando el usuario está conectado y su intención es desconectarse.
- Paso de **activo a tirado**, cuando el usuario está conectado y, aunque su intención es seguir estándolo, la red no lo acepta, el procedimiento es análogo al del paso de inactivo a rechazado.
- Paso de **tirado a tirado**, cuando no está conectado y la intención sigue siendo 1, después de haber sido tirado por la red.
- Paso de **tirado a inactivo**, cuando ha sido tirado por la red, y la intención pasa de 1 a 0.
- Paso de **rechazado a rechazado**, cuando ha sido rechazado y mantiene su intención de estar conectado.
- Paso de **rechazado a inactivo**, cuando ha sido rechazado por la red, y la llamada original finaliza, pasando la intención a 0.

Una vez obtenido el número necesario de recursos para dar servicio, a partir del mismo, se calcula la potencia final necesaria, que depende del servicio que el usuario quiera utilizar y del número de antenas a las que esté conectado. Así, el cálculo de la potencia necesaria se define en la ecuación 3.5.

$$Potencia_necesaria = Num_{Rb} \cdot N_{Ae} \cdot \frac{P_{Tx}}{Total_{Rb}} \quad (3.5)$$

- Num_{Rb} número de resource blocks, valor calculado en el paso anterior.
- P_{Tx} , potencia transmitida por la estación base, que en el caso de una MACRO, serían 40 W.
- $Total_{Rb}$, número total de resource blocks (capacidad de los que dispone la estación base).

Tabla 3.1: Tipos de traspasos

TIPO	DEFINICIÓN
Traspaso	Cambian todas las antenas respecto a la iteración anterior
Traspaso suave	Hay al menos, una estación en común respecto a la iteración anterior
No traspaso	Hay las mismas antenas que en la iteración anterior

- N_{Ae} , número de estaciones base (de sectores en realidad) a las que se conecta el usuario.

■ Traspasos

El último paso es el cálculo del número de traspasos que realiza un usuario a lo largo de la duración de los servicios que cursa. Durante las distintas iteraciones se van contando el número de veces que un usuario cambia de estaciones durante el curso de un servicio. Además se tiene en cuenta el tipo de traspaso, según el número de antenas que cambia. En la Tabla 3.1, se detallan los distintos tipos y los momentos en los que se dan.

En el caso de que el usuario sólo pueda conectarse a una estación, no existirá traspaso suave, puesto que o cambia la estación o no. Además si se pasa a más o menos estaciones, en el primer caso, si alguna estación se mantiene, será un traspaso suave y si cambian todas un traspaso. Mientras que si se reduce el número de antenas, si las que quedan ya estaban antes, se considerará no traspaso, si por el contrario, alguna de las restantes, no se encontraba en el anterior caso, se trata de un traspaso suave.

■ Criterio

Este es otro paso importante a la hora de calcular la potencia final necesaria. Sin embargo, así como los pasos anteriores están implementados en todos los escenarios analizados en el marco del proyecto, este no. Se trata de añadir al cálculo los criterios obtenidos de los resultados de los primeros escenarios. Para describir apropiadamente esta clase, conviene analizar previamente los resultados obtenidos con las anteriores, según las diferentes configuraciones empleadas, por lo que será en más detallada en el siguiente capítulo de este documento.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se van a explicar los resultados obtenidos durante las distintas fases del trabajo, detallando para ello, tanto los escenarios utilizados, como las métricas empleadas.

4.1. Fase Previa

Esta parte, tiene como objetivo analizar el comportamiento de las técnicas CoMP en cuanto a potencia recibida, al conectarse un mismo usuario a más de una antena simultáneamente para el downlink (enlace de bajada o descendente).

Por lo tanto, los datos que interesa obtener en esta fase, son los señalados a continuación:

- SINR de cada usuario.
- Potencia total recibida por cada usuario.

La simulación de esta etapa se desarrolla en un escenario urbano de dimensión $2000 \times 2000 m^2$, con un conjunto de 7 estaciones siguiendo la topología que se muestra en la Figura 4.1, con un despliegue hexagonal y una separación de $450m$ entre cada estación. Se trata de BS macro, que emiten a una potencia de $40W$, a la frecuencia de $2.1 GHz$, utilizando 3 sectores. Para la realización de este trabajo, como ya se ha explicado en el apartado 3.1, se va a considerar cada sector como si se tratara de una antena diferente, contando de este modo con 21 estaciones.

Además, se sitúan aleatoriamente sobre el escenario, 5 usuarios de diferente tipo distinto, situados en diferentes posiciones aleatorias para cada iteración, haciendo un total en un total de 1000 iteraciones. Cada tipo de usuario se puede conectar a un número distinto de antenas, desde una a cinco. En este caso, no se tienen en cuenta la intención del usuario, ni los servicios cursados (pues no afectan a las métricas que se quieren analizar). Se asume que siempre quiere acceder a la red, así como que en todos los casos es aceptado por la estación base. Se establece un umbral de recepción

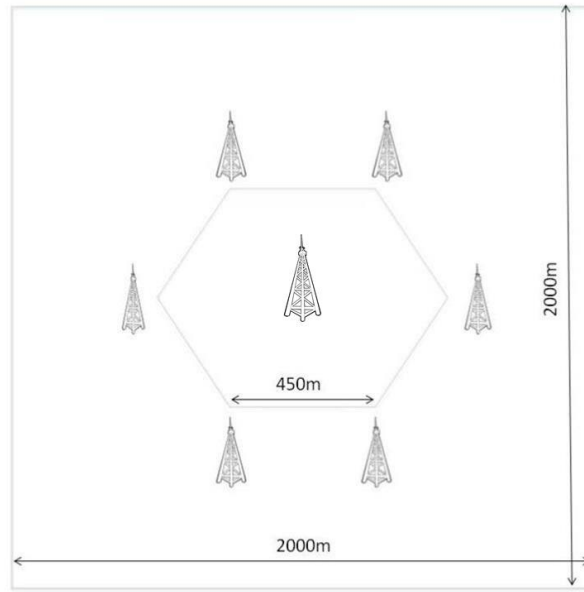


Figura 4.1: Distribución estaciones base

de $-10dB$, por debajo del cual, el usuario no va a intentar conectarse a la estación de la que recibe la señal, pues es tan baja que no sería posible establecer una conexión estable. Así, los usuarios de la red, pueden acceder a ella con el máximo número de antenas posible siempre, excepto que no sea posible la conexión debido a que la señal de recepción es menor que la del umbral establecido.

De esta forma, una vez obtenidos los datos de la SINR, la Figura 4.2 representa la función distribución acumulada correspondientes para los diferentes máximos de antenas.

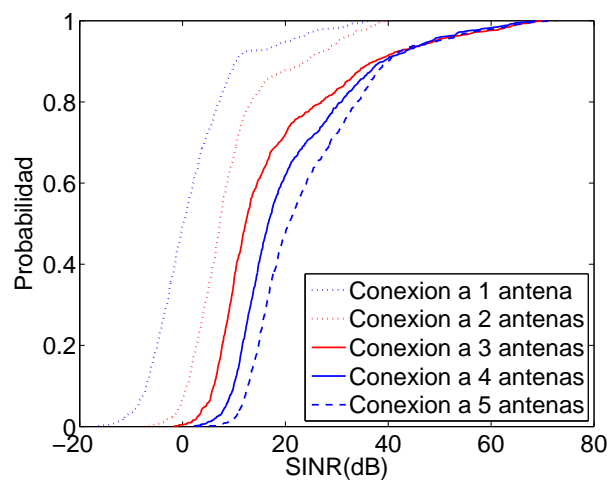


Figura 4.2: Función de distribución acumulada de la SINR

Analizando la gráfica se observa una mejora creciente de la SINR, a

medida que aumenta el número de antenas con las que puede conectarse el usuario. Esto es debido a que la SINR aumenta de forma proporcional a la potencia recibida de las estaciones base, por lo que si se recibe señal de más antenas, se incrementa la potencia recibida (ver fórmula 3.2), creciendo así, el valor de la SINR. La mayor ganancia, se observa en la transición de una a dos antenas, mientras que a partir de 3, el aumento es menos apreciable.

Teniendo en cuenta únicamente la métrica anterior, podría concluirse que cuantas más antenas, mejor rendimiento; sin embargo, es necesario seguir estudiando más parámetros. De esta forma, la Figura 4.3, representa la media de la potencia recibida por un usuario, frente el número antenas a las que se conecta.

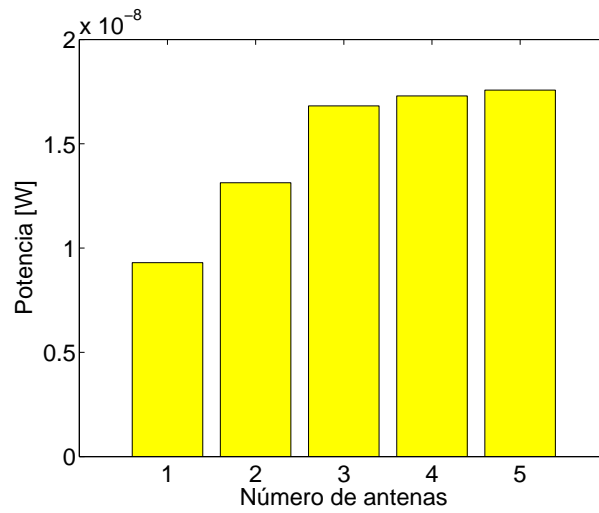


Figura 4.3: Potencia recibida según el número de antenas

La potencia aumenta con el número de antenas, pero nuevamente, el mayor incremento se produce con el paso de una a dos, o de dos a tres, siendo la ganancia, a partir de 3 antenas, casi insignificante.

Estas medidas concuerdan con los datos representados en la Figura 4.2; se puede concluir por tanto, que no es eficiente conectarse a un número mayor de 3 antenas, puesto que ya no se produce un gran beneficio en términos de SINR, y se está empleando más potencia para transmitir, consumiendo más energía y recursos.

Para continuar con el estudio de la conducta de las técnicas CoMP, es necesario determinar en qué casos es rentable para el usuario, en lo que a SINR se refiere, conectarse a una antena más, ya que puede que no siempre sea beneficioso. Para ello, a partir de los datos de SINR obtenidos previamente, junto con los de las potencias recibidas por el usuario, se calcula el incremento de potencia recibida con el número de antenas, respecto a conectarse a una antena más, utilizando la expresión 4.1.

$$Relacion_{potencias} = \frac{Potencia_{x+1}}{Potencia_x} \quad (4.1)$$

- $Potencia_{x+1}$. Potencia total recibida de una conexión con una antena adicional.
- $Potencia_x$. Potencia total recibida con el número actual de antenas.

Un usuario se conectará inicialmente, a las estaciones de las que mayor potencia reciba, así, si la siguiente potencia más alta que recibe el usuario, tiene un valor parecido a la actual, la relación anterior tenderá a uno, de lo contrario, lo hará a cero.

Estos valores, son representados en la Figura 4.4, analizando el incremento de SINR que percibe el usuario, al conectarse a una antena más.

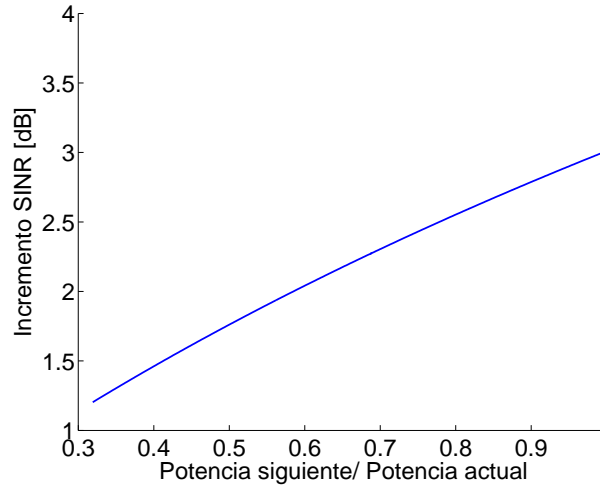


Figura 4.4: Incremento de potencia en función del número de antenas

En la gráfica se contempla que si la siguiente señal recibida, es la misma que con el estado actual de antenas, la SINR obtenida se duplica, mientras que para una mayor diferencia, el incremento podría ser insignificante. Para analizar los siguientes escenarios se han escogido 3 valores arbitrarios de incremento de SINR; 1, 2 y 3 dB, para los cuales, si el aumento alcanzado con una antena más no llega a un crecimiento prefijado, no se justificaría que el usuario se conectara a más antenas.

Sin embargo, no siempre se va a tener en cuenta este umbral en la simulación, pues como se ha explicado en el apartado 3.3, la mayor eficiencia espectral que se puede alcanzar en este trabajo está limitada a 5, que se corresponde con un valor de SINR de 18.602 dB (ver ecuación 4.2). De esta forma, a partir de ese valor de SINR, por mucho más que este aumente al conectarse a más antenas, el número de resource blocks necesarios para la transmisión no disminuirá, sino que se mantendrá, y se estarán malgastando

recursos de esas nuevas antenas, para transmitir a la misma potencia que si se estuviesen utilizando menos antenas. De esa manera, si con el número actual de estaciones se logra dicho valor, el usuario no se conectará a más antenas, aunque el incremento de SINR sea mayor que el umbral establecido.

$$SINR = \frac{2^{\frac{S_{max}}{BW_{eff} \cdot \eta}} - 1}{SINR_{eff}} \quad (4.2)$$

Donde se han empleado los siguientes valores:

- $\eta \cdot BW_{eff} = 0.85$
- $SINR_{eff} = 1.25 \sim 1\text{dB}$
- $S_{max} = 5$.

Finalmente, los resultados obtenidos durante esta fase se aplican a la herramienta, de tal forma que se limita el número máximo de antenas a las que el usuario puede conectarse a 3. Esto se recoge en el archivo de configuración. Para cada tipo de usuario se especifica el máximo de antenas a las que puede conectarse. Este método se aplica en todos los escenarios.

Por otro lado, para establecer el criterio para elegir el número de estaciones a las que conectarse, se crea una nueva clase para añadir al núcleo, ya mencionada en el apartado 3.3, llamada Criterio. En ella, se obtienen de los Parámetros del usuario, las estaciones a las que puede conectarse. Se comprueba si al conectarse a ellas se supera el valor de 18.602 dB de SINR y, en caso de no ser así, se tiene en cuenta el siguiente criterio de superar en 1dB , 2dB ó 3dB (según el escenario), la ganancia de SINR para conectarse a una estación más. Si el valor de SINR es mayor que el primer umbral, se queda directamente con el número de antenas actual. Al diferencia del resultado anterior, esta clase no está implementada en todos los escenarios.

4.2. Fase 2

Después de analizar el comportamiento de la herramienta y de las técnicas CoMP sin establecer ningún criterio adicional, este apartado va a centrarse en estudiar el modo de actuar de dichas técnicas, estableciendo un máximo de antenas a las que conectarse, así como sus posible beneficios.

4.2.1. Escenarios

Los escenarios utilizados en esta fase cuentan con un modelo común en cuanto a usuarios y estaciones, sólo se distinguen en el número máximo de antenas a las que un usuario puede conectarse. Se trata de un despliegue sobre una superficie de $2000 \times 2000\text{m}^2$, y con un conjunto de 7 estaciones base con 3 sectores cada una, emitiendo a una potencia de 40W , al igual que en la fase previa.

En cuanto a los usuarios utilizados, ya no se despliegan en ninguno de los casos en posiciones aleatorias, sino que siguen la trayectoria establecida en las trazas y se incrementan desde 50 hasta 500, con un paso 50 para cada simulación. Además para la elaboración de las gráficas se cuenta con 360, iteraciones y 10 repeticiones con cada tipo de usuario. Se describen dos tipo de usuarios, según la clase de servicio que cursan:

- Servicio 1.
 - Capacidad de 0,2Mbps.
 - Requerido por el 60 % de los usuarios en el escenario.
 - Tiempo medio de servicio: 30s.
 - Tiempo medio entre llegadas: 60s.
- Servicio 2.
 - Capacidad de 1Kbps.
 - Requerido por el 40 % de los usuarios en el escenario.
 - Tiempo medio de servicio: 150s.
 - Tiempo medio entre llegadas: 600s.

A diferencia de la fase previa, se cuenta con la intención del usuario; esto es, si quiere acceder a la red o no, así como con la carga de las estaciones base, para saber si puede ser aceptado. Con las premisas descritas y las ecuaciones $Carga_{estaciones}$ y $Carga_{usuarios}$, se obtiene la carga máxima aceptada por el conjunto de las 7 estaciones de la red, a partir de la ecuación $Carga_{estaciones}$, 1890Mbps, mientras que la carga máxima generada por los usuarios, obtenida con la ecuación $Carga_{usuarios}$ es de 190Mbps.

$$Carga_{estaciones} = N_{Rb} \cdot Bw_{Rb} \cdot S \cdot Num_{bs} \cdot Num_{sect} \quad (4.3)$$

Donde,

- N_{Rb} , número de resource blocks soportados por la estación base.
- Bw_{Rb} , ancho de banda de cada recurso.
- S , eficiencia espectral.
- Num_{bs} , número total de estaciones desplegadas en el escenario.
- Num_{sect} , número de sectores por cada estación.

$$Carga_{usr} = Num_{usr} \cdot \left[\left(Porcentaje_{serv1} \cdot Capacidad_{serv1} \cdot \frac{T_{m1}}{T_{\ell1}} \right) + \left(Porcentaje_{serv2} \cdot Capacidad_{serv2} \cdot \frac{T_{m2}}{T_{\ell2}} \right) \right]$$

Donde,

- Num_{usr} , número de usuarios máximo en la red.
- $Porcentaje_{servx}$, porcentaje de uso del servicio.
- $Capacidad_{servx}$, capacidad del servicio.
- T_{mx} , tiempo medio de duración del servicio.
- $T_{llegadasx}$, tiempo medio entre llegadas del servicio.

Con estos valores, se observa que la red diseñada nunca va a estar saturada, ya que la carga generada por todos los usuarios, es inferior a la que es capaz de soportar soporta el conjunto de las estaciones.

Los distintos escenarios que se analizan en esta fase son los siguientes:

- Escenario 1

En este caso, todos los usuarios tienen como máximo número de antenas al que se pueden conectar, 1 (escenario LTE común), y no se aplica la clase Criterio. Un usuario siempre podrá conectarse, cuando la SINR sea mayor que $-10dB$, suponiendo que la no estuviese saturada.

- Escenario 2

Este escenario es idéntico al anterior, con la salvedad de que el número máximo de antenas para cada usuario es 2 (escenario CoMP). A pesar de ello, la clase Criterio sigue sin aplicarse; es decir, un usuario puede conectarse a las 2 estaciones siempre que la SINR con cada una de ellas sean superiores a $-10dB$, y las estaciones puedan aceptar al usuario.

- Escenario 3

Es idéntico a los escenarios 1 y 2, a excepción de que el número máximo de antenas para cada usuario es 3 (escenario CoMP). Se considera, al igual que en el escenario 2, que el usuario puede conectarse a su máximo de estaciones, mientras la SINR esté por encima del umbral de $-10dB$, ya que en este caso tampoco se implementa la clase Criterio.

4.2.2. Métricas

A continuación se estudiarán los resultados obtenidos tras las simulaciones correspondientes, con el fin de realizar una comparativa entre los 3 escenarios descritos y averiguar en qué casos se obtiene una mayor eficiencia y una calidad de servicio mejor.

La primera observación se centra en el modelado de los servicios y su calidad, para ver si, al incrementar el número de antenas, esta se ve perjudicada.

Para ello, se averigua el número de veces que un servicio ha intentado conectarse y cuántos de esos intentos son exitosos, rechazados o tirados, en función del número de usuarios. Estos datos se obtienen según el servicio

cursado y el máximo de antenas empleado. Se realizan 10 repeticiones para cada número de usuario y 360 iteraciones por repetición, y se obtienen las gráficas representadas en la Figura 4.5, en las que se representan los porcentajes de los distintos estados mencionados, para cada repetición y el promedio de todas las repeticiones.

Examinando las gráficas, se observa que para el servicio 1, un aumento del número de antenas, no reduce el número de conexiones exitosas, ni aumenta el de rechazos, sino que se mantiene igual, aumentando ligeramente la probabilidad de éxito. Además, en este caso no influye el número de usuarios, ya que se trata de un servicio de 0,2Mbps y las estaciones no se llegan a saturar.

Por otro lado, analizando el comportamiento de los despliegues para el caso del servicio 2, se nota una reducción en cuanto al número de conexiones exitosas, respecto al anterior. Esto es debido a que el servicio que se está cursando, tiene una mayor duración, por lo que hay una mayor probabilidad de que sea rechazado. Además, en el primer y segundo escenarios, se produce una pequeña disminución de conexiones exitosas a medida que crece el número de usuarios, pues el servicio es de mayor capacidad (1Mbps), por lo que es posible que algunas estaciones lleguen a saturarse. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, al aumentar el número de estaciones, no se reducen las conexiones exitosas, sino que experimentan un ligero aumento.

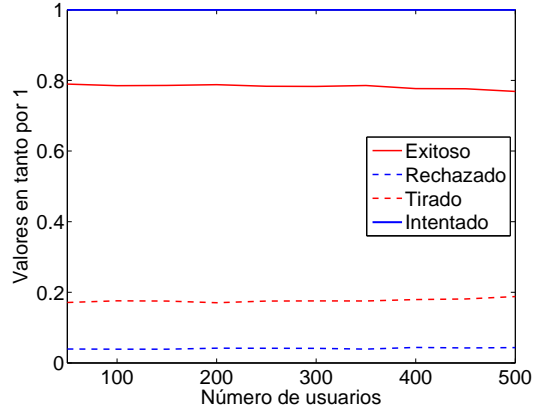
De este modo, se puede concluir que conectarse a más estaciones no perjudica la calidad de servicio, sino que la mejora, ya que la probabilidad de tirar antes un servicio, es mayor o igual para la conexión a una antena, que para dos y tres. Además, para estas dos últimas alternativas no existe mucha diferencia.

Siguiendo con el estudio de la calidad, el siguiente parámetro que se analiza es la cantidad de traspasos que se producen. En este caso se obtiene, al completarse todas las iteraciones de una repetición, el número de traspasos y traspasos suaves que se han producido, así como la duración del servicio (fotografías en las que ha estado activo). Este último dato permite caracterizar el número producido de traspasos, independizando el resultado de la duración de los servicios.

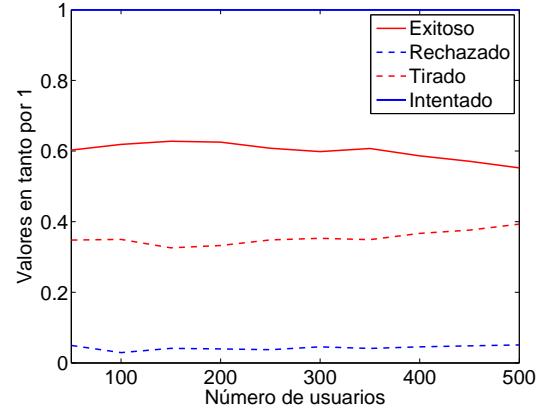
Así, en las gráficas de la Figura 4.6, se representan, para cada servicio, según el número de usuarios y el número de antenas a las que éste se conecta, la media de traspasos el servicio para cada repetición, y la media total de todas las repeticiones.

En el caso del escenario 1, el número de traspasos suaves es nulo, ya que como se ha explicado en el apartado 3.3, no pueden producirse este tipo de traspasos. Analizando el primer servicio, se ve como el número de traspasos, disminuye a medida que aumenta el de antenas, y pasan a darse traspasos suaves, pues es menos probable que de una iteración a otra, cambien todas las antenas. Además, el número de traspasos, no se ve afectado por la cantidad de usuarios, sino que se mantiene estable.

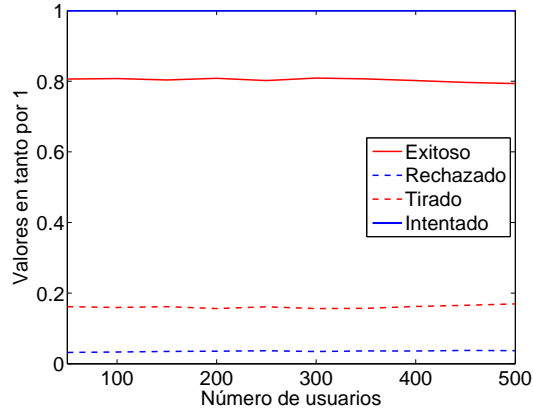
En cuanto al segundo servicio, al igual que para el anterior, no varía el



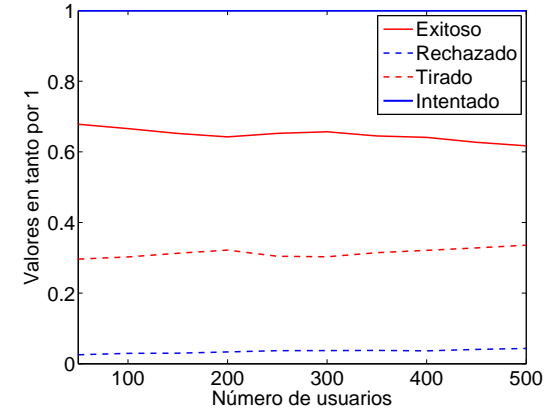
(a) 1 antena (servicio 1)



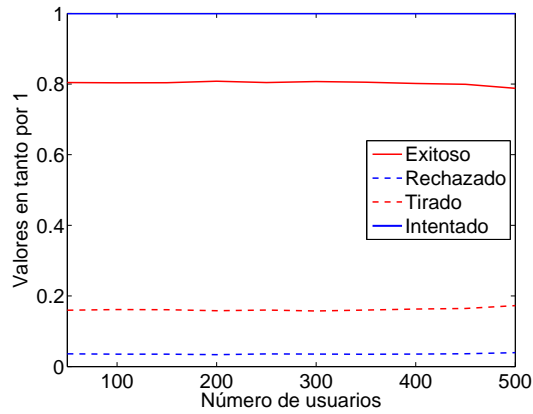
(b) 1 antena (servicio 2)



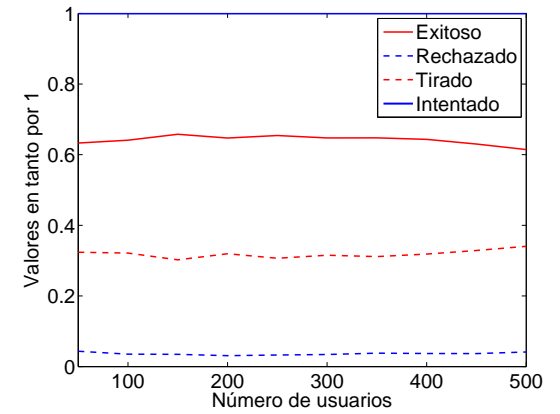
(c) 2 antenas (servicio 1)



(d) 2 antenas (servicio 2)

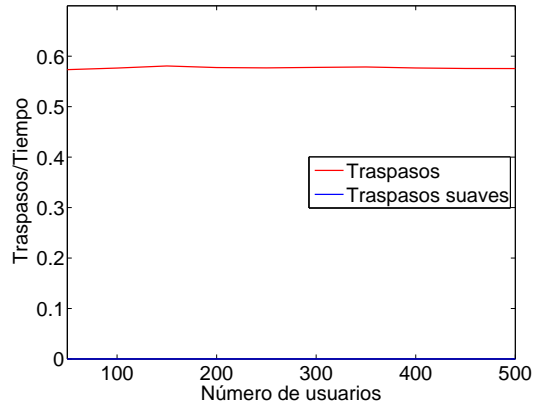


(e) 3 antenas (servicio 1)

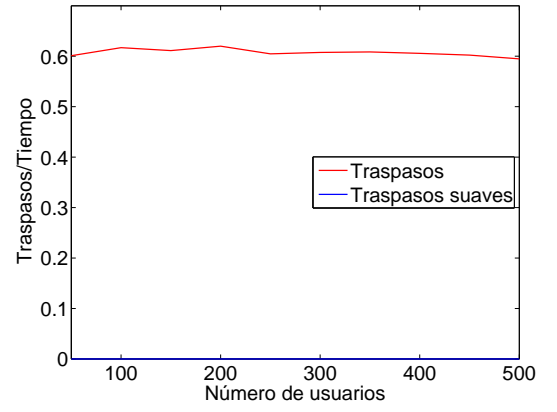


(f) 3 antenas (servicio 2)

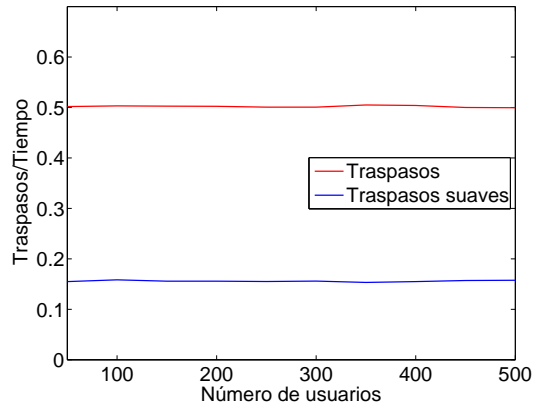
Figura 4.5: Calidad de servicio



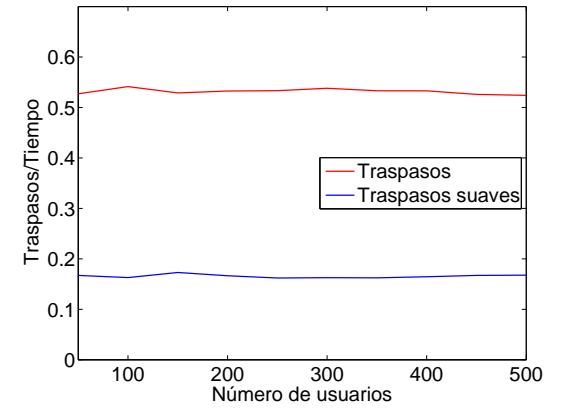
(a) 1 antena (servicio 1)



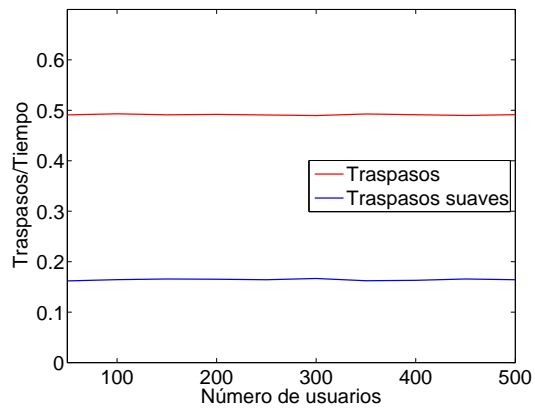
(b) 1 antena (servicio 2)



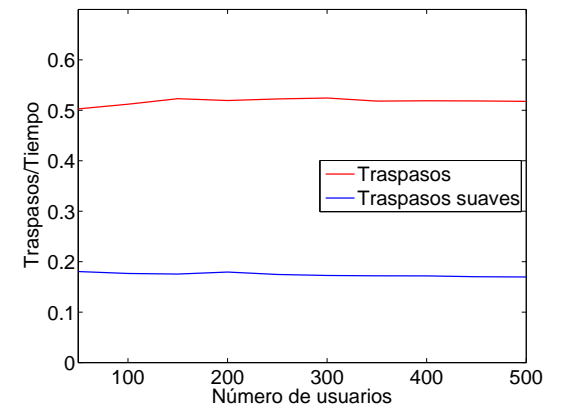
(c) 2 antenas (servicio 1)



(d) 2 antenas (servicio 2)



(e) 3 antenas (servicio 1)



(f) 3 antenas (servicio 2)

Figura 4.6: Trasposos

número de traspasos con los usuarios, pero sí lo hace al aumentar a más de uno el número de antenas. Asimismo, se observa un mayor número de traspasos que para el primer servicio, pues como ya se ha explicado, éste tiene una mayor duración.

Nuevamente se observa que, al utilizar más antenas, no se reduce la calidad del servicio.

Una vez comprobado que los servicios no se ven perjudicados con el uso de técnicas CoMP, se pasa a estudiar otro tipo de métrica, como es la carga en las estaciones base. Para ello, se obtiene en los tres escenarios, la carga de cada uno de los sectores; esto es, el número de resource blocks que son utilizados, en cada iteración. Se representan en la Figura 4.7, a través de la media de todos los valores de carga a lo largo de las 360 iteraciones, de los 21 sectores, para las 10 repeticiones, alcanzando así la carga media por unidad de tiempo, para cada uno de los usuarios y en cada escenario.

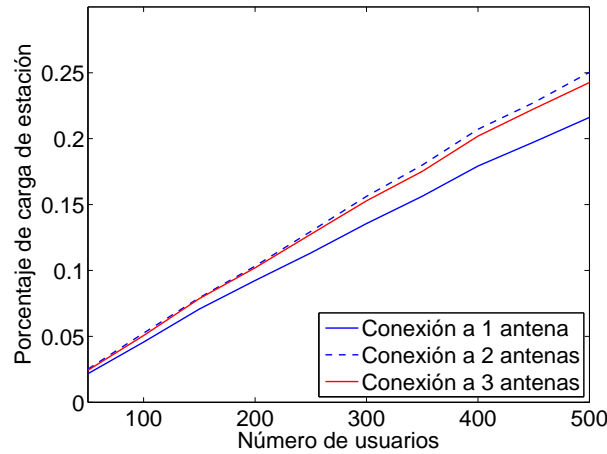


Figura 4.7: Carga media de las estaciones base

En la gráfica anterior, se observa un nivel de carga similar para los escenarios 2 y 3, siendo un poco menor para el primero. Con el fin de estudiar más en detalle esta métrica, se han elaborado las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10. En ellas, se representa la función de distribución acumulada de la carga para tres densidades de usuarios diferentes (50, 250 y 450), a través de los valores con los que se han representado la Figura 4.7.

Se observa que para un mayor número de usuarios, aumenta la carga en las estaciones y que para una antena, hay una menor saturación de las mismas. Para el caso de 50 usuarios, en ningún caso se satura ninguna BS, a diferencia de las otras dos situaciones. Para 250 usuarios, hay estaciones que llegan a saturarse en los escenarios 2 y 3 y para 450 usuarios, en todos los escenarios se observan estaciones saturadas. Esto confirma lo comentado previamente sobre calidad del servicio, al rechazarse más servicios para un mayor número de usuarios. Otro aspecto a resaltar, es la homogeneidad de la carga, que es más apreciable, para el escenario de tres estaciones, debido

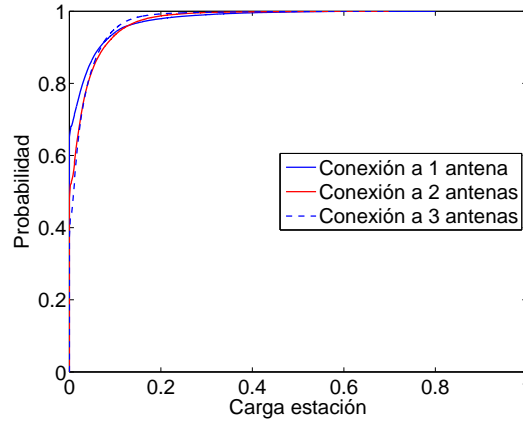


Figura 4.8: Función de distribución acumulada de la carga de las estaciones con 50 usuarios

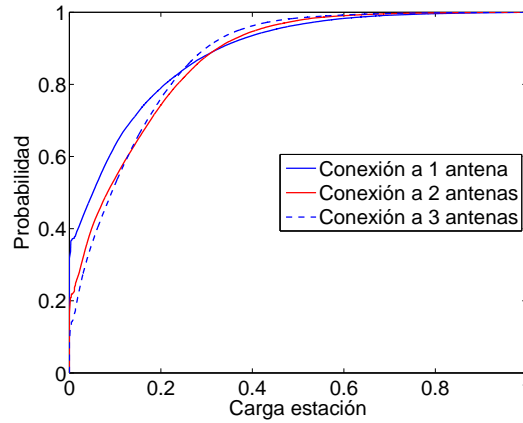


Figura 4.9: Función de distribución acumulada de la carga de las estaciones con 250 usuarios

al mejor uso y distribución de los recursos.

Para justificar el hecho de que haya más carga en los escenarios 2 y 3 es necesario analizar la eficiencia, puesto que las estaciones pueden estar más cargadas en esos casos debido a que se está cursando un mayor tráfico. Para ello, además de los recursos empleados por cada sector, se obtiene en cada iteración el tráfico cursado, a partir de la capacidad de los servicios, utilizando con la siguiente expresión:

$$Trafico = Num_{serv1} \cdot C_{serv1} + Num_{serv2} \cdot C_{serv2} \quad (4.4)$$

En la cual:

- Num_{serv1} . Número de servicios del tipo 1 que están activos.
- C_{serv1} . Capacidad del servicio 1.

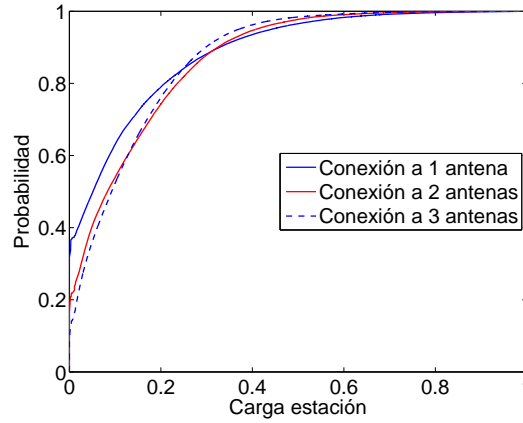


Figura 4.10: Función de distribución acumulada de la carga de las estaciones con 450 usuarios

- Num_{serv2} . Número de servicios del tipo 2 que están activos.
- C_{serv2} . Capacidad del servicio 2.

La Figura 4.11, representa (promedio de las 10 repeticiones) el número de resource blocks partido por el tráfico (en Mbps), para cada uno de los escenarios, y en función del número de usuarios.

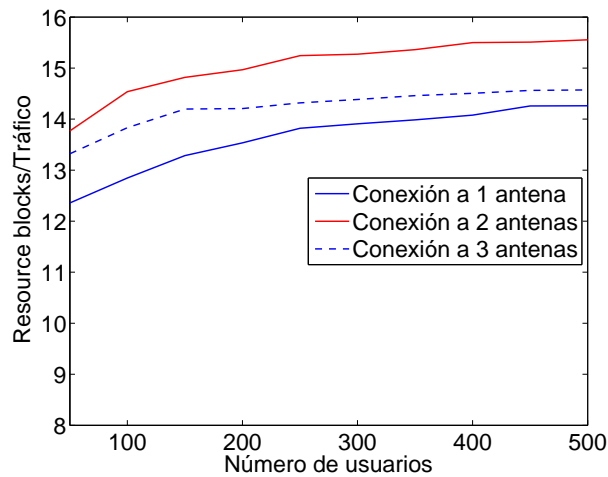


Figura 4.11: Relación resource blocks-Tráfico

Considerando los resultados obtenidos, se observa que, para la conexión a una antena, se necesita un menor número de resource blocks para cursar $1Mbps$, obteniendo una mayor eficiencia. Además, para los tres escenarios, se observa como el número de resource blocks va aumentando con el número de usuarios, debido a la saturación de las estaciones; al no ser posible conectarse siempre a la antena de la que mayor potencia se recibe, se produce un

aumento en el número de resource blocks necesarios para cursar el mismo tráfico.

Para los escenarios 2 y 3, aunque al conectarse a un mayor número de estaciones la SINR aumenta, necesitándose un menor número de resource blocks, esa cantidad de recursos la obtiene el usuario de todas las antenas con las que se conecta, por lo que el número de resource blocks necesario, se multiplica por ese número de antenas. Si las potencias recibidas son muy parecidas y esa SINR se incrementa mucho (es decir, la relación de potencias vista en la fase previa (Figura 4.4), tiende a 1), aunque el número de resource blocks se multiplique, no superará al necesario cuando se conecta con una única antena; de lo contrario, se necesitará un mayor número de recursos. En este caso, al no establecer ningún criterio para conectarse a más antenas, los usuarios siempre se conectan a las que les sea posible, aunque la SINR apenas aumente, por lo que la eficiencia es mayor en el caso de una antena. El estudio para saber cuando mejora la conexión, en términos de eficiencia, con un mayor número de antenas, se realiza en la tercera fase.

Al igual que en el caso de la carga de las estaciones, para ver más en detalle esta eficiencia se representa la función de distribución acumulada para determinadas densidades de usuarios: 50, 250 y 450. Esta función es generada a través de las muestras con las que se ha realizado la media del tráfico por número de resource blocks. Estos resultados se muestran en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

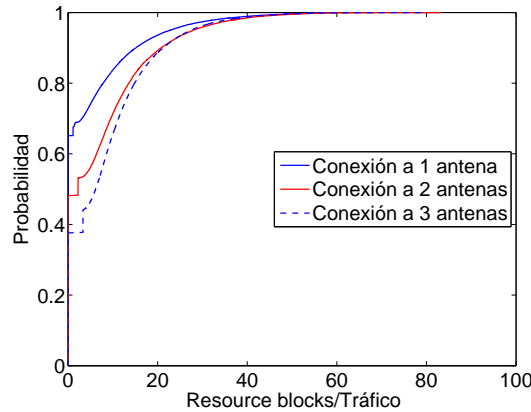


Figura 4.12: Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estaciones con 50 usuarios

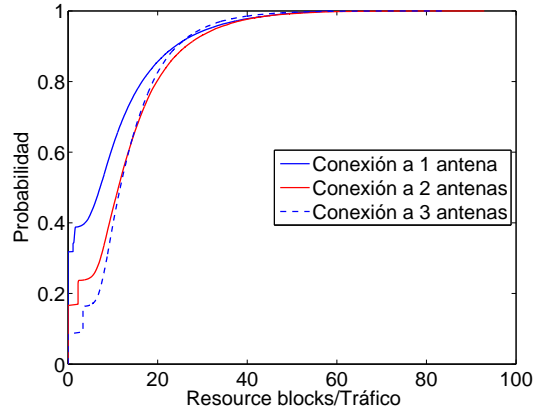


Figura 4.13: Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estaciones con 250 usuarios

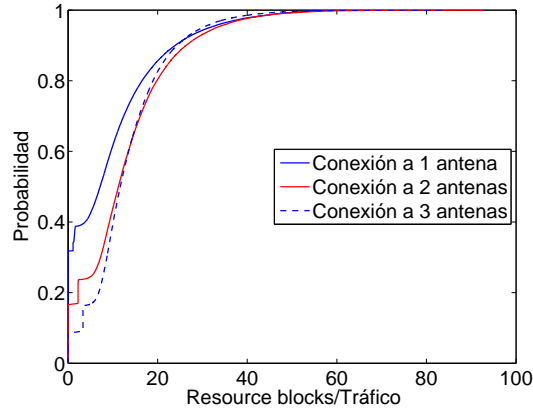


Figura 4.14: Función de distribución acumulada de la eficiencia de las estaciones con 450 usuarios

4.3. Fase 3

Una vez examinados los resultados de la fase 2, parece necesario determinar qué incremento de SINR se necesita para mejorar la eficiencia de las técnicas CoMP y ver cómo influye en la calidad del servicio. Para ello, basándose en la Figura 4.4, se escogen los valores de $1dB$, $2dB$ y $3dB$ de aumento de SINR.

4.3.1. Escenarios

Los escenarios utilizados en esta fase se desarrollan con unos valores comunes de usuarios, estaciones y servicios, que coinciden con los utilizados en la fase previa. Sin embargo se diferencian respecto a los anteriores en el número de antenas máximo de las que dispone cada usuario, así como las

clases utilizadas en la herramienta para su simulación.

- Escenario 4

En este escenario los usuarios cuentan con un máximo de 3 antenas y durante su simulación se aplica la clase Criterio, conectándose de este modo a las antenas necesarias, según los umbrales establecidos en la fase previa; un incremento de $1dB$ para conectarse a la siguiente estación y una SINR máxima de $18.602dB$ de SINR, para poder conectarse a la siguiente estación.

- Escenario 5

Al igual que en el escenario 4, el máximo número de antenas es 3, y se aplica el módulo Criterio, evitando conectarse a más antenas si ya se han superado los $18.602dB$ de SINR, pero con un valor diferente para decidir si hay que conectarse a la siguiente estación, con un umbral de $2dB$.

- Escenario 6

Es similar a los escenarios 4 y 5, pero con un umbral mayor en el empleo de la clase Criterio. En este caso, para conectarse a la siguiente antena, es necesario que la SINR se incremente en $3dB$.

4.3.2. Métricas

En esta segunda parte van a analizarse los tres últimos escenarios (4, 5 y 6), en los que se ha aplicado el criterio de conexión CoMP, frente a los escenarios 1, 2 y 3, realizando una comparativa entre ellos, con el fin de determinar las posibles ventajas o desventajas de aplicar un criterio para la conexión a más de una antena.

Para ello, la primera métrica que se va a analizar, es la correspondiente a la calidad de los servicios, a partir de los resultados de conexiones exitosas, rechazadas, tiradas e intentadas, de los escenarios 2 y 3, y los obtenidos de las simulaciones de los últimos escenarios. Con todos ellos se elaboran las gráficas representada en las Figuras 4.15 y 4.16.

Se observa que tanto para el servicio 1, como para el servicio 2, al utilizar el criterio de conexión CoMP, se obtiene un mayor número de éxitos en las conexiones, ya que no se están desperdiciando tantos recursos, sin mirar el incremento de SINR que pueda suponer. Además, como en todos los escenarios, a medida que aumenta el número de usuarios, se reduce el número de éxitos. Se podría decir que la utilización del criterio propuesto mejora la calidad de servicio, con pocos usuarios, tendiendo a mostrar el comportamiento de la solución más sencilla a medida que aumentan los usuarios. Es importante recalcar que en ningún caso se ve perjudicada la calidad, sino que se ve mejorada.

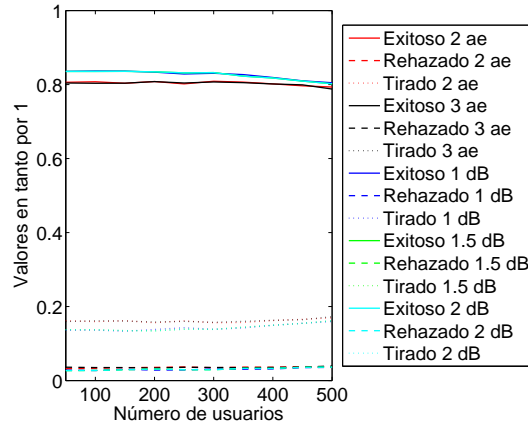


Figura 4.15: Calidad del servicio para servicio 1

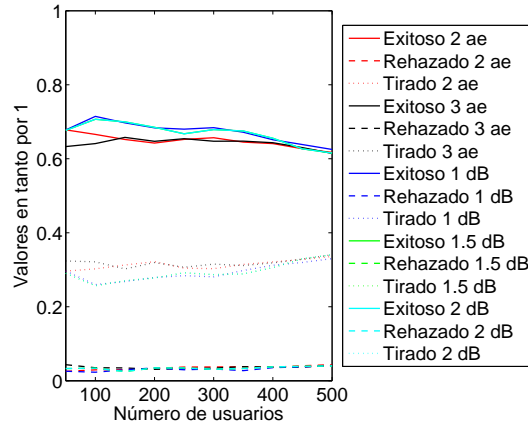


Figura 4.16: Calidad del servicio para servicio 2

Una vez visto que la calidad de servicio no empeora, se pasa a estudiar la carga media por unidad de tiempo de las estaciones, frente al número de usuarios comparando los resultados de todos los escenarios.

En la Figura 4.17 se observa que el escenario 4 (incremento de $1dB$), tiene un comportamiento que se asemeja más al del escenario 3 (conexión a 3 estaciones), mientras que el 5 (incremento de $2dB$) es más cercano al 2 (conexión a 2 estaciones) y el 3 (incremento de $3dB$) se encuentra entre el 5 y el 1 (conexión a 1 estación). Esto es debido a que el criterio propuesto hace que, no todos se conecten a 3 antenas y, para una mayor restricción, una menor probabilidad de que así sea. En la Figura 4.18 se representa la función de distribución acumulada, viendo las probabilidades con las que se conectan los usuarios a un número u otro de estaciones en cada escenario.

En el caso del escenario 6, la probabilidad de que los usuarios se conecten a una o dos antenas, es mayor que en los escenarios 4 y 5. En el escenario 4 es en el que menor probabilidad hay de que se conecten a un número de

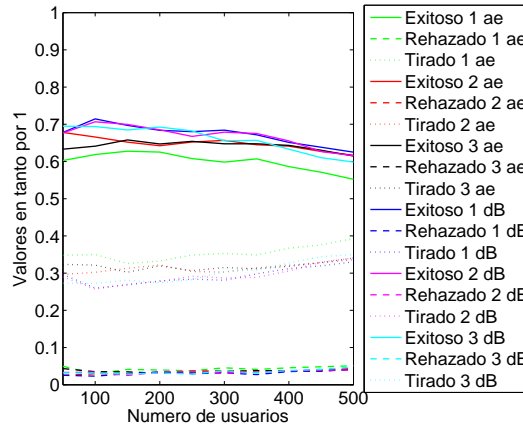


Figura 4.17: Carga media de las estaciones base

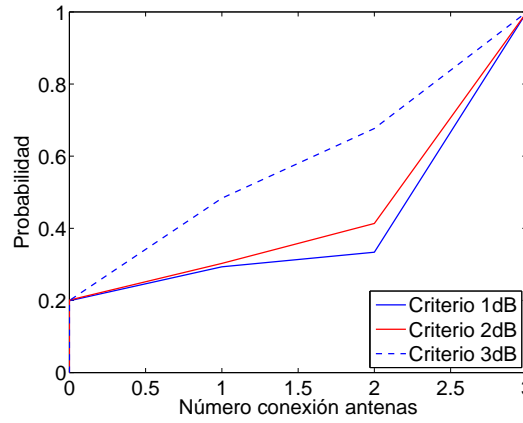


Figura 4.18: Función de distribución acumulada de número de estaciones

estaciones menor que 3. Se puede decir, por tanto, que las semejanzas entre los escenarios en el comportamiento de la carga vienen explicadas por esta métrica.

Por último, para entender las cargas de las estaciones y ver si las diferencias se deben al tráfico cursado o a la eficiencia, se va a estudiar una última métrica, la relación entre los resource blocks y el tráfico correspondiente. Se comparan todos los escenarios, tal y como se refleja en la Figura 4.19.

Estudiando los resultados, se observa como en el caso de la eficiencia, se vuelven a poner de manifiesto las semejanzas vistas en el modelo de carga. Así, los escenarios 4, 5, 6 y 7 presentan una eficiencia menor. En el caso del primer y último escenarios, se observa como la eficiencia es bastante parecida, incluso llegando a mejorar con el aumento de usuarios. Esto es debido a que, al saturarse las estaciones en el caso de una única conexión, la SINR va a ser muy baja, mientras que conectándose a 3, con el criterio de aumento de $3dB$, la SINR va a ser mayor en el caso de que cumpla la restricción; cuando no sea así, se conectará a un menor número de antenas,

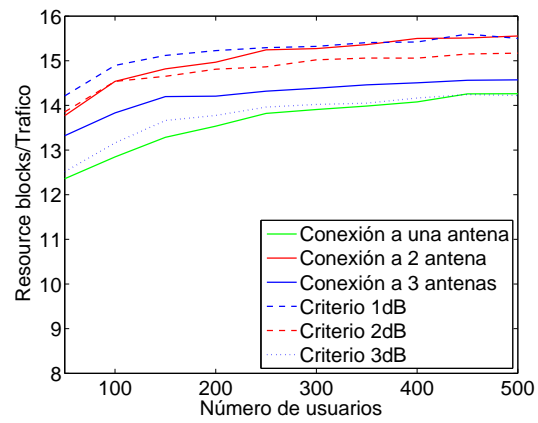


Figura 4.19: Resource blocks/Tráfico

pero no desperdiciará resource blocks.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se expondrán las conclusiones alcanzadas tras analizar los resultados obtenidos en los escenarios LTE propuestos, con el uso de técnicas CoMP.

El trabajo ha sido desarrollado en diferentes etapas. En la primera, se ha estudiado el comportamiento en términos de SINR, para ver si realmente se obtenía una mejora en cuanto a potencia recibida y saber si existía algún límite razonable en el número de antenas a las que conectarse. De esta primera fase, se ha obtenido que el número máximo de antenas a las que podría conectarse un usuario para alcanzar una mayor SINR es 3; a partir de dicho valor, la SINR apenas aumenta. Otro aspecto a resaltar de esta fase es que cuanto más parecido sea el valor de potencia de las señales recibidas, mayor es la ganancia en SINR obtenida, llegando a ser el doble si las potencias recibidas son iguales.

Posteriormente, se ha realizado la segunda etapa, en la que se han examinado distintos escenarios, en función del máximo número de conexiones que puede utilizar un usuario simultáneamente, incrementándolas desde 1 a 3. Se compara una situación LTE tradicional (1 antena), con escenarios CoMP. En este caso, además de las ventajas del uso de estas técnicas de coordinación comentadas con anterioridad, se ha observado que existe una disminución de la interferencia, que hace que la potencia recibida se incremente, produciendo una mejor recepción con el consiguiente beneficio de la calidad de servicio, menor número de llamadas rechazadas o tiradas. Además, el número de traspasos se reduce, y se introducen los traspasos suaves, en los que no todas las estaciones cambian al mismo tiempo. Así, se puede concluir que existe una mejora notable en el comportamiento de los servicios. En cuanto a la carga de las estaciones, cabe resaltar que en los resultados se ha puesto de manifiesto otra ventaja, produciéndose una carga más homogénea, más repartida entre todas las estaciones. Sin embargo, es en esta métrica en la que se observó que el comportamiento es mejor al conectarse a una antena, es decir, se necesita un menor número de resource blocks para cursar el mismo tráfico, que cuando se conecta a 2 ó 3.

Para mejorar las condiciones de eficiencia en los escenarios de conexión

simultánea con varias antenas, se ha desarrollado una tercera fase, en la cual se han establecido unos criterios de conexión CoMP, según los cuales, el usuario no se conecta al máximo número de antenas siempre que reciba señal de ellas, sino que tiene que garantizarse un incremento de SINR superior a un umbral establecido. A partir de los resultados obtenidos se ha concluido que, además de mejorar la calidad del servicio (incluso más que en la fase 2), en el caso de que la SINR tenga que ser $3dB$ mayor para conectarse a varias antenas, la eficiencia es igual o ligeramente superior que cuando hay una única conexión.

De esta forma, se puede concluir que el uso de técnicas CoMP en redes LTE mejora la calidad del servicio, favoreciendo una red más homogénea en términos de carga; además, aplicando los criterios necesarios, la eficiencia del sistema no se ve perjudicada.

Partiendo de la herramienta desarrollada en la elaboración de este trabajo, aparecen numerosas líneas futuras de investigación, añadiendo más módulos. Entre los estudios mas interesantes a acometer, se encuentran las técnicas de optimización, con el fin de obtener una mejor distribución de la carga, proporcionando cobertura a un mayor número de usuarios. Además, podría estudiarse el comportamiento sobre redes heterogéneas, caracterizadas por una mayor diversidad de estaciones; también resultaría interesante analizar escenarios considerando usuarios que no puedan conectarse a más de una antena.

Bibliografía

- [1] Varios Autores, *About 3gpp home*, url<http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>, 2015.
- [2] Narcís Carmona, Juan José Olmos, Mario García, José F. Monserrat, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, 1.^a ed.
- [3] Zakrzewska, A.; Ruepp, S. ; Berger, M.S., “Towards converged 5G mobile networks-challenges and current trends”, *ITU Kaleidoscope Academic Conference: Living in a converged world - Impossible without standards?*, *Proceedings of the 2014*, 2014.
- [4] Varios Autores, *Casi 500 millones de conexiones lte en el mundo*, 2014.
- [5] Preben Mogensen, Wei Na, István Z. Kovács, Frank Frederiksen, Akhilesh Pokhariyal, Klaus I. Pedersen, Troels Kolding, Klaus Hugl, and Markku Kuusela, “LTE Capacity Compared to the Shannon Bound”, *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, 2007.
- [6] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2.^a ed.
- [7] M.F.L. Abdullah, A.Z Yonis, “Performance of LTE Release 8 and Release 10 in wireless communications”, *Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec), 2012 International Conference on*, 2012.
- [8] Luis Fernando Pedraza, César Hernández, Dora María Ballesteros, *Modelo del desvanecimiento selectivo en frecuencia*, 2012.
- [9] Bishwarup Mondal, Eugene Visotsky, Timothy A. Thomas, Xiaoyi Wang, Amitava Ghosh, “Performance of downlink comp in LTE under practical constraints”, *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, 2012.