



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

# Planificación de una red LTE mediante un simulador a nivel de sistema en MATLAB

Autor: David Ladera Iñiguez

Tutora: Cat. Dra. Ana García Armada

Madrid, Diciembre de 2016



Título: Planificación de una red LTE mediante un simulador a nivel de sistema en MATLAB

Autor: David Ladera Iñiguez

Tutora: Cat. Dra. Ana García Armada

## EL TRIBUNAL

Presidente: Dr. Víctor P. Gil Jiménez

Vocal: Dr. Carlos García Rubio

Secretario: D. Alejandro de la Fuente Iglesias

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 21 de diciembre de 2016 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Nacemos, crecemos y cambiamos, cambiamos mucho pero disfrutamos más. La vida es un largo y apasionante viaje, como también lo ha sido esta larga carrera.

Me gustaría dedicar este proyecto a mis padres por creer siempre en mí, por su apoyo incondicional y por su insistencia en no desviarme de mi camino, pero sobre todo por esas grandes oportunidades que han brindado en mi vida como es el viajar. Poder visitar 47 países que me han permitido soñar, aprender, enriquecerme como persona, disfrutar, cometer locuras, reír...

Agradecer a mi tutora, Ana García, por su flexibilidad a la hora de llevar a cabo este proyecto y por ayudarme siempre que la he necesitado.

Por supuesto no olvidarme de una larga lista de personas muy importantes, familia y amigos. Una especial mención a mi hermana pequeña Carlota que me idolatra demasiado, hermanos, abuelos, mi tía Marta, primas, Lucy por estar siempre a mi lado y todos mis amigos cercanos, Chemi, Marian, Ana, Iru, Palo, Jorge, Puech, Hugo, Alfonso, etc y otros tantos que han estado a mi lado estos años, mis amigos de Madrid, mis amigos de Mallorca, de otros lugares, Zeynep, Amir, Erasmus, Jorge, Victor, compañeros de clase, Alberto, Alvaro, Jeff, Jesús... Y tantos otros.

Stay hungry. Stay foolish.

Steve Jobs, 2005

Whole Earth Catalog, 1974



# Resumen

Actualmente se estima que el 56% de la población mundial tiene acceso a internet a través de la red móvil. El tráfico que esto supone se encuentra alrededor de 6,2 exabytes mensuales. En las proyecciones para los próximos 3 años se espera un crecimiento que sitúe el acceso a internet en torno al 65% de la población mundial y un consumo mensual de 30 exabytes.[1][2]

Por ello la comprensión del diseño y planificación de una red móvil capaz de soportar todo el tráfico se hace indispensable. Para ello existen diversas herramientas, una de las cuales son los simuladores. Existen diferentes tipos de simuladores como existen diferentes tipos de sistemas operativos. Con lo cual, el uso de un simulador que funcione en la mayoría de los sistemas operativos más importantes se hace necesario.

Este proyecto, se basa en el estudio de un simulador LTE basado en Matlab, dada la potencia de esta herramienta de software matemático adaptada para diferentes plataformas. Dicho simulador ha sido diseñado por el “Institute of Telecommunications” de la universidad de Viena y está basado en la tecnología LTE, ya que es una de las últimas disponibles en el mercado.

En concreto, empleando el simulador “LTE Downlink System-Level Simulator v1.6” se han llevado a cabo diferentes simulaciones para la comprensión de una red LTE. Este proyecto se divide principalmente en tres posibles escenarios variando el número de eNodeBs y de UEs y estudiando todas las posibles condiciones.

Finalmente se incluye un cuarto escenario donde se realizan las mismas pruebas en entornos reales. Con todos los resultados se extraen unas conclusiones y se plantean futuros escenarios.

**Palabras clave:** LTE, 4G, OFDM, MIMO, Simulador, eNodeB, UE.





# Abstract

Nowadays, it is estimated that 56% of the global population has access to mobile internet . Data traffic produced by that is around 6,2 exabytes monthly. Forecast for the next 3 years is to increase reaching 65% of the global population and 30 exabytes data traffic monthly respectively.[1][2]

Because of that, knowledge about a network's design and planning to be able to manage all this traffic is indispensable. To perform this action there are some available tools, one of them are the simulators. There are different kind of simulators the same way that there are different kind of OS. Using a multi-platform simulator becomes necessary.

This thesis, it is based on the study of a LTE simulator based in Matlab, due to the power of this mathematical software tool available for a lot of systems. This simulator has been designed by the Institute of Telecommunications at the Vienna University and it is based on LTE, because it is one of the last technologies available on the market.

Most concretely using the "LTE Downlink Sytem-Level Simulator v1.6" some simulations has been performed to understand the LTE network. Basically, this thesis is divided in 3 possible scenarios varying the number of eNodeBs and UEs and studying all the possible factors.

In addition there is a fourth scenario where all these tests are performed in real places. With the results some conclusions are obtained and a future forehead is proposed.

**Keywords:** LTE, 4G, OFDM, MIMO, Simulator, eNodeB, UE.



# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Fases del desarrollo y medios empleados.....	3
1.4 Estructura de la memoria.....	4
<b>LTE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Evolución de las comunicaciones móviles .....	5
2.2 Requisitos LTE .....	8
2.2.1 Eficiencia .....	8
2.2.2 Ancho de banda .....	8
2.2.3 Frecuencia .....	8
2.2.3 Eficiencia espectral .....	8
2.2.4 Velocidad de movimiento.....	9
2.2.5 Cobertura .....	9
2.3 Técnicas de acceso múltiple .....	9
2.3.1 OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access.....	9
2.3.2 SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access.....	10
2.4 Flexibilidad de espectro .....	11
2.5 Canales físicos de bajada y subida .....	13
2.6 Modos de transmisión.....	15
2.7 Modulación y codificación .....	17
2.8 Estimación del canal.....	19
2.9 Planificadores .....	20
2.9.1 Round Robin .....	20
2.9.2 Best CQI.....	20
2.9.3 Prop Fair Sun.....	20
2.9.4 FFR.....	21
2.9.5 Alpha Fair.....	21
2.9.6 Max Min.....	22
2.9.7 Max Throughput.....	22
2.9.8 Resource Fair .....	22
2.9.9 Constrained.....	22
<b>SIMULADOR LTE .....</b>	<b>23</b>
3.1 Introducción al simulador .....	23
3.1.1 Simulador a nivel de enlace < System Link >.....	24
3.1.2 Simulador a nivel de sistema < System Level > .....	25
3.2 Estructura general del simulador .....	26
3.3 Características principales .....	28
3.3.1 Configuraciones de simulaciones.....	28
3.3.2 Opciones de depuración .....	29

3.3.3 Opciones de representación .....	29
3.3.4 Parámetros generales .....	30
3.3.5 Opciones de la generación de números aleatorios .....	30
3.3.6 Tiempo de simulación .....	31
3.3.7 Opciones de caché .....	31
3.3.8 Distribución de la red y parámetros macroscópicos de las pérdidas por trayecto .....	32
3.3.9 Desvanecimiento de gran escala .....	34
3.3.10 Desvanecimiento de pequeña escala .....	34
3.3.11 Configuración de los UEs.....	35
3.3.12 Configuración de los eNodeBs.....	36
3.3.13 Configuración de los planificadores.....	36
3.3.14 Opciones del CQI .....	37
3.3.15 Opciones del canal de subida .....	37
3.3.16 Media de SINR.....	37
3.3.17 Guardar los resultados .....	38
3.3.18 Parámetros opcionales .....	38
3.4 Ejecución y gráficas .....	39
3.4.1 Curvas BLER y asignación CQI .....	40
3.4.2 Diagrama de radiación la antena .....	41
3.4.3 Modelo de pérdidas macroscópicas por trayecto .....	41
3.4.4 Desvanecimiento de gran escala .....	42
3.4.5 SINR y CQI .....	43
3.4.6 Interfaz 1. Resultados obtenidos de eficiencias y SINR .....	45
3.4.7 Interfaz 2. Posición de los UEs y eNodeBs.....	46
<b>SIMULACIONES.....</b>	<b>47</b>
4.1 Simulaciones realizadas .....	47
4.2 Escenario 1 .....	48
4.2.1 Modos de transmisión .....	48
4.2.2 Pérdidas por trayecto debido al entorno .....	49
4.2.3 Eficiencia espectral y CQI.....	51
4.2.4 BLER.....	52
4.3 Escenario 2 .....	54
4.3.1 Modos de transmisión .....	54
4.3.2 Pérdidas por trayecto debido al entorno.....	55
4.3.3 Pérdidas debidas al canal de transmisión .....	57
4.3.4 Planificadores .....	59
4.4 Escenario 3 .....	61
4.4.1 Tri_Sector .....	61
4.4.2 Tri_Sector_plus_femtocells.....	67
4.4.3 Omnidirecional_eNodeBs .....	72
4.5 Escenario 4 .....	77
4.5.1 Metodología de las mediciones .....	77
4.5.2 Mediciones de los eficiencias.....	79
<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>87</b>
5.1 Conclusiones.....	87
5.2 Líneas futuras .....	88
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>89</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>91</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>95</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Estructura de un transmisor y receptor OFDMA .....	10
Figura 2. Estructura de un transmisor y receptor SC-FDMA.....	10
Figura 3. Estructura de una trama en LTE .....	11
Figura 4. Estructura de un bloque de recursos (RB).....	12
Figura 5. Diagrama de una trama Downlink .....	13
Figura 6. Diagrama de una trama Uplink .....	14
Figura 7. CLSM (izquierda) frente a MIMO (derecha).....	16
Figura 8. Estructura de una señal de referencia de descarga en un puerto de la antena ...	19
Figura 9. Posibles escenarios del simulador LTE a nivel de enlace [21] .....	24
Figura 10. Diagrama esquemático de bloques de un simulador a nivel de sistema [21]...	25
Figura 11. Estructura completa del simulador.....	27
Figura 12. Diferentes tipos de simulaciones disponibles .....	29
Figura 13. Opciones generales de configuración.....	31
Figura 14. Configuración del desvanecimiento de pequeña escala .....	35
Figura 15. Script básico de ejecución.....	39
Figura 16. Relación entre la BLER, SNR y los CQIs .....	40
Figura 17. SNR respecto a su CQI normalizado a un 10% de BLER .....	40
Figura 18. Diagrama de radiación de una antena Kathrein tipo 742212 .....	41
Figura 19. Modelo de pérdidas por trayecto TS 36.942 tipo urbano.....	42
Figura 20. Pérdidas por trayecto de cada sector. Modelo TS 36.942 .....	42
Figura 21. Generación del desvanecimiento de gran escala.....	43
Figura 22. Asignación del SINR. Mapeo del CQI. Diferencia de SINR. Asignación de sectores de los eNodeBs. Con desvanecimiento de gran escala. ....	43
Figura 23. Asignación del SINR. Mapeo del CQI. Diferencia de SINR. Asignación de sectores de los eNodeBs. Sin desvanecimiento de gran escala. ....	44
Figura 24. SINR en la región de interés .....	44
Figura 25. Interfaz 1. Resultados obtenidos de eficiencias y SINR para 150 UEs .....	45
Figura 26. Interfaz 2. Mapa con las posiciones de los UEs y eNodeBs .....	46
Figura 27. Mapa de cobertura con un eNodeB y 3 UEs.....	49
Figura 28. Pérdidas por trayecto para modelo macroscopico COST231 urban macro ...	50
Figura 29. Mapa de situación de los UEs .....	51
Figura 30. Posiciones de los UEs .....	53
Figura 31. Velocidad desplazamiento de los UEs frente a su eficiencia .....	57
Figura 32. Velocidad desplazamiento de los UEs en vehículos frente a su eficiencia .....	58
Figura 33. Indices de justicia de los planificadores.....	60
Figura 34. Mapa de eNodebs y UEs en una simulación tipo tri_sector.....	61

Figura 35. Velocidad desplazamiento de los UEs frente a su eficiencia para una simulación tri_sector .....	65
Figura 36. Velocidad desplazamiento de los UEs en vehículos frente a su eficiencia para una simulación tri_sector .....	65
Figura 37. Mapa de eNodebs y UEs en una simulación tipo tri_sector_plus_femtocells .	67
Figura 38. Mapa de eNodebs y UEs en una simulación tipo omnidireccional_eNodeBs..	72
Figura 39. Modo Field Test del Iphone, en la izquierda y aplicación brújula del Iphone, en la derecha. ....	77
Figura 40. Localización de un eNodeB mediante Combain Positioning Solutions.....	78
Figura 41. Mapa con posiciones de los UEs y eNodeB 71698442 .....	81
Figura 42. Mapa con posiciones de los UEs y eNodeB 71735326 .....	85

# Índice de tablas

Tabla 1. Comparación simplificada de las diferentes generaciones de redes móviles .....	6
Tabla 2. Número de RBs necesarios para cada ancho de banda.....	12
Tabla 3. Modos de transmisión.....	15
Tabla 4. Esquema de modulación, ECR y eficiencia para cada indicador de calidad del canal en LTE .....	18
Tabla 5. Comparación de la eficiencia según el modo de transmisión.....	48
Tabla 6. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas generadas en diferentes entornos urbanos y suburbanos .....	50
Tabla 7. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas producidas en entornos rurales vs urbanos .....	51
Tabla 8. Eficiencia, eficiencia espectral, SINR y CQI de 3 UEs.....	52
Tabla 9. Diferentes medidas incluyendo ruidos con y sin desvanecimiento de gran escala..	53
Tabla 10. Eficiencia de varios UEs empleando diferentes modos de transmisión .....	55
Tabla 11. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas generadas en diferentes entornos urbanos y suburbanos para diferentes números de UEs.....	56
Tabla 12. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas producidas en entornos rurales vs urbanos para diferentes números de UEs .....	57
Tabla 13. Eficiencia obtenida por los UEs para diferentes planificadores .....	59
Tabla 14. Resultados simulación tri_sector .....	62
Tabla 15. Modos de transmisión para una simulación tri_sector .....	63
Tabla 16. Pérdidas por trayecto para una simulación tri_sector .....	63
Tabla 17. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación tri_sector .....	64
Tabla 18. Desvanecimiento de gran escala para una simulación tri_sector.....	66
Tabla 19. Planificadores para una simulación tri_sector .....	66
Tabla 20. Resultados simulación tri_sector_plus_femtocells.....	68
Tabla 21. Modos de transmisión para una simulación tri_sector_plus_femtocells .....	68
Tabla 22. Pérdidas por trayecto para una simulación tri_sector_plus_femtocells.....	69
Tabla 23. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación tri_sector_plus_femtocells.....	70
Tabla 24. Desvanecimiento de gran escala para una simulación tri_sector_plus_femtocells .....	70
Tabla 25. Planificadores para una simulación tri_sector_plus_femtocells.....	71
Tabla 26. Resultados simulación omnidirectional_eNodeBs .....	73
Tabla 27. Modos de transmisión para una simulación omnidirectional_eNodeBs.....	73
Tabla 28. Pérdidas por trayecto para una simulación omnidirectional_eNodeBs .....	74

Tabla 29. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación omnidireccional_eNodeBs .....	75
Tabla 30. Planificadores para una simulación omnidireccional_eNodeBs .....	76
Tabla 31. Mediciones reales para eNodeB 71698442 .....	80
Tabla 32. Mediciones reales para eNodeB 7173526 .....	84



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Durante los últimos años el uso de las redes móviles no ha hecho más que aumentar año tras año. Desde la aparición de los primeros teléfonos móviles se han ido añadiendo nuevas funciones que requieren un uso más intensivo de la red de telefonía.

Lo que en un principio comenzó con el uso de las redes, por parte de unos pocos privilegiados que tenían acceso a la telefonía móvil y sólo empleaban dicha red para realizar llamadas, ha pasado a ser de dominio público, siendo actualmente el número de suscripciones a una línea de telefonía móvil superior al número de habitantes en la tierra. Si bien es cierto que tan sólo dos tercios de la población tiene acceso a la telefonía móvil, la cantidad de datos que se transfieren a través de las redes móviles sigue siendo inmensa. Ésta se estima en 3 exabytes mensuales. [1]

Actualmente, se usan las redes móviles no sólo para transmitir datos de teléfonos móviles, sino de diferentes dispositivos: Smartphones, Tablets, ordenadores portátiles, etc. Muchos de los usuarios realizan un uso intenso de la red transmitiendo todo tipo de archivos multimedia y por tanto necesitan una red de alta velocidad. Otra situación muy común es la saturación de las redes móviles debido al número de usuarios que intentan acceder a ella, ya sea por la gran cantidad de población, situaciones especiales como eventos, catástrofes u otras causas.

Por todo ello, más que nunca, se precisa el desarrollo de redes de telefonía móvil capaces de transmitir datos a altas velocidades y con un alto rendimiento.

Una de las herramientas disponibles para dicha mejora, son los simuladores. Empleando simuladores de redes de telefonía móvil, se puede entender mejor como funcionan las redes y buscar posibles mejoras. Existen diferentes opciones disponibles en el mercado, aunque una de las opciones más abiertas, es una basada en Matlab como es "LTE Downlink System-Level simulator v1.6" desarrollado por la universidad de Viena.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La escasez de información sobre como emplear dicho simulador y comprender su uso y potencial, junto con entender mejor el funcionamiento de las redes LTE, ha motivado este proyecto.

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es analizar, comprender y simular la planificación de una red LTE mediante el simulador "LTE Downlink Sytem-Level Simulator v1.6".

Se definen diferentes conceptos clave, se explica el funcionamiento del simulador y se realizan diferentes pruebas a lo largo de este proyecto, con el objetivo de analizar el máximo número de escenarios posibles para obtener un retrato de lo que puede suceder en la realidad.

En base al objetivo principal se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Comprensión de las características principales de una red LTE así como sus requisitos fundamentales.
- Importancia que radica el uso de un simulador y el saber configurarlo correctamente así como emplearlo.
- Analizar el mayor número de escenarios posibles variando el número de eNodeBs y UEs e introducir el mayor número de subcasos posibles.
- Estudiar la variación de eficiencia recibida por un UE desde todos los ángulos posibles.
- Comparar los escenarios analizados en el simulador con una panorámica de la realidad.
- Extraer conclusiones y líneas futuras.

Todos estos objetivos son desarrollados a lo largo de este proyecto y estudiados con la intención de mostrarlos de una manera clara y entendible para un público con un conocimiento medio de la materia.

Además otros objetivos derivados de los anteriores son afianzar la importancia de conceptos clave sobre las redes móviles y la importancia de tecnologías como LTE, OFDM, MIMO, simuladores, etc.

## 1.3 Fases del desarrollo y medios empleados

Este proyecto ha contado con diferentes fases de desarrollo. Estas fases varían entre ellas. Además, intervienen diferentes aspectos como son la investigación, el aprendizaje de las herramientas empleadas, la simulación mediante software y estudios reales a pie de calle. A continuación se pueden ver enumeradas todas las fases llevadas a cabo.

1. Primero se ha analizado el funcionamiento de LTE entendiendo todos los conceptos clave para su funcionamiento y enfocándose más en los necesarios para el uso del simulador.
2. Segundo se ha analizado los diferentes simuladores analizando sus ventajas e inconvenientes y escogido el más versátil.
3. Tercero se ha aprendido a manejar el simulador, así como maximizar sus posibilidades.
4. Cuarto se han realizado las diferentes simulaciones y creado las funciones y scripts extras necesarios para el proyecto.
5. Quinto se han medido casos en escenarios reales estudiados previamente en las simulaciones.
6. Finalmente se han juntado todos los datos obtenidos y se ha escrito esta memoria.

Respecto a los medios utilizados para la realización del proyecto no han sido necesarios una gran cantidad de recursos, sólo se ha precisado de hardware y software, no siendo necesario el uso de laboratorios. A continuación se listan los medios.

- **Hardware** - Se ha empleado un portátil Macbook Pro equipado con un procesador Intel Core i5 a 2,7 GHz y 8 GB de RAM tipo DDR3 para el simulador y un Iphone 6 Plus para el escenario 4.
- **Software** - Se ha empleado MATLAB para poder ejecutar el simulador y crear gráficas, el simulador "LTE Downlink System-Level simulator v1.6", Pages para la redacción de la memoria, el modo FieldTest del Iphone y la aplicación SpeedTest para medir la eficiencia en el Iphone.
- **Otros medios** - Además se ha empleado otro tipo de software online como Combain Positioning Solutions, mapas de cobertura de la red Movistar y Google Maps.

## 1.4 Estructura de la memoria

La siguiente sección recoge un breve resumen de cada capítulo para facilitar al lector la comprensión de la estructura.

Capitulo 1 - En el presente capítulo del proyecto, se muestra porqué se ha elegido el estudio de un simulador, los objetivos fijados y como se han llevado a cabo las diferentes fases.

Capitulo 2 - Muestra la evolución de las redes móviles a lo largo de estos años. A continuación explica los conceptos fundamentales sobre LTE, profundizando en los conceptos necesarios para el uso del simulador.

Capitulo 3 - Se encarga de explicar las principales diferencias entre las dos versiones del simulador de la universidad de Viena, un esquema general del simulador elegido, la configuración del mismo y los posibles resultados que proporciona el simulador empleado.

Capitulo 4 - Se encarga de mostrar los diferentes escenarios que se han estudiado con el simulador. Divide el capítulo en cuatro escenarios, tres de ellos sobre el simulador a nivel de sistema estudiando lo que sucede con los UEs al variar multitud de parámetros, eNodeBs, UEs y celdas. Un cuarto escenario muestra una situación más realista tras analizar situaciones reales.

Capitulo 5 - Recoge las conclusiones obtenidas tras las simulaciones, aparte de posibles líneas futuras.

Presupuesto - Recoge el presupuesto de la planificación de la red mediante el uso del simulador.

Apéndice - Facilita la instalación del simulador junto con todos los complementos requeridos y las pequeñas modificaciones necesarias para su uso.

Glosario - Define las siglas de términos empleados.

# Capítulo 2

## LTE

### 2.1 Evolución de las comunicaciones móviles

Las primeras comunicaciones móviles surgen a partir del año 1946 con el desarrollo de unas celdas por parte de Bell System [4], éstas se realizaban mediante dispositivos que se asemejaban más a una radio por su funcionamiento. Dichos dispositivos tenían una movilidad limitada, una baja calidad de transmisión, eran pesados y muy costosos. Se suele denominar a esta generación como la pre-generación o 0G.

Los primeros sistemas de comunicaciones móviles aparecieron en los 70, comercializándose a gran escala en los 80. Es lo que se conoce como la primera generación 1G y la cual se divide en diferentes sistemas analógicos desarrollados alrededor del mundo. AMPS (Analogue Mobile Phone System) en América, TACS (Total Access Communication System) en Europa, NMT (Nordic Mobile Telephone) en los países nórdicos y J-TACS (Japanese Total Access Communication System) en Japón y Hong Kong.[4]

El uso de dispositivos móviles a nivel global no fue posible hasta la década de los 90 gracias a la llegada de GSM (Global System for Mobile communications). Se conoce como la segunda generación denominada 2G, que introdujo el uso de señales digitales. Contaba con varias mejoras respecto a generaciones anteriores como la calidad de voz y la introducción de protocolos de seguridad. El reparto de espectro disponible se realiza mediante división del tiempo de emisión y recepción usando TDMA y la separación de bandas para emisión y recepción y subdivisión de canales mediante FDMA [5]. Las frecuencias más empleadas son GSM 850, GSM 900, GSM 1800 y GSM 1900.

Las novedades más destacadas de la segunda generación fueron la creación del servicio de mensajes cortos (SMS), el acceso WAP que permitía acceder a internet con páginas renderizadas, a velocidades de 9,6 Kbit/s y por último servicios de localización móvil.

Los cambios se fueron produciendo de generación en generación, aunque también existen pequeños cambios entre sub-generaciones con mejoras menores pero importantes.

## CAPÍTULO 2: LTE

Dentro de la segunda generación se produjo la denominada 2.5G que se usa para describir la entrada del GPRS en el año 2000 con unas velocidades mayores, alcanzando los 53,6 Kbit/s y la 2.75G para denominar la tecnología EDGE (Enhanced GPRS) con velocidades aproximadas de 217,6 Kbit/s.

Durante enero del 2002 comenzó a funcionar la primera red pública de 3G en Seul, mientras que ésta estaba basada en el standard de CDMA en Europa, en otros países se empleó UMTS definido en la familia 3GPP, que ya se había empezado a usar un mes antes de manera no comercial por parte de Telenor en Suecia.

La generación 3G requería sustituir los repetidores existentes pero a cambio ofrecía mejoras como mayores tasas de velocidad, QoS y conexiones más estables. Aunque la ITU tenía la intención de unificar los estándares con esta generación no lo consiguió.

<b>Redes móviles</b>						
<b>Generación</b>	<b>Generación de transición</b>	<b>Años</b>	<b>Standard</b>	<b>Velocidad descarga</b>	<b>Velocidad subida</b>	<b>Servicios</b>
<b>0G</b>		1946 - 1980	MTS - MTA	-	-	Voz
<b>1G</b>		1979 - 1990	AMPS, TACS, NMT	-	-	Voz
<b>2G</b>		1991	GSM, CDMA, TDMA	14,4 Kbit/s	14,4 Kbit/s	Voz, SMS
	<b>2.5G</b>	2000	GPRS	53,6 Kbit/s	26,8 Kbit/s	Voz, SMS, WAP, MMS
	<b>2.75G</b>	2003	EDGE	217,6 Kbit/s	108,8 Kbit/s	Voz, SMS, MMS, datos
<b>3G</b>		2002	UMTS, CDMA 2000,	384 Kbit/s	128 kbit/s	+ audio alta calidad, video
	<b>3.5G</b>	2005	HSPA	7,2 Mbit/s	3,6 Mbit/s	+ VOIP
	<b>3.75G - 3.9G</b>	2008	HSPA+	42,2 Mbit/s	11,5 Mbit/s	+ streaming video
<b>4G</b>		2009	WiMax LTE	100 Mbit/s	50 Mbit/s	+ dispositivos inteligentes
	<b>4G+</b>	2013	LTE Advanced	600 Mbit/s	300 Mbit/s	+ streaming video alta definición
<b>5G</b>		2020	-	> 1 Gbit/s	> 500 Mbit/s	-

*Tabla 1. Comparación simplificada de las diferentes generaciones de redes móviles*

## CAPÍTULO 2: LTE

En la tabla 1 se muestran todas las generaciones existentes hasta la fecha, aunque pueden existir discrepancias respecto a las fechas y tasas máximas de transferencia. La tabla muestra los años de lanzamiento de manera comercial así como las velocidades más comunes para cada generación ya que éstas se amplían con las diferentes revisiones.

Respecto a la generación 3G, se divide principalmente en dos estándares UMTS y CDMA con unas velocidades de 384 KBit/s. La siguiente generación de transición es HSPA (HSDPA/HSUPA) con una tasa de descarga de 7,2 MBit/s y posteriormente HSPA+ con una velocidad de descarga de 42,2 Mbit/s, aunque actualmente mediante MC-HSPA con tecnología MIMO 4x4 se han conseguido picos de 672 Mbit/s.

La siguiente generación en aparecer y la última de las disponibles actualmente de manera comercial es la generación 4G. La primera red lanzada LTE, que técnicamente pertenece a 3.9G, fue introducida por primera vez en Estocolmo y Oslo en el año 2009. Desde entonces se ha expandido a más lugares, estando actualmente disponible en dos tercios de los países existentes. Las velocidades de LTE varían según la configuración que se emplee, siendo éstas habitualmente entre 50 y 100 Mbit/s y pudiendo llegar a alcanzar los 300 Mbit/s. Aunque como ya se ha dicho, técnicamente la 3GPP no la definió como 4G en sus primeras versiones, comercialmente LTE si se conoce con la nomenclatura de 4G. [8]

Algunas de las ventajas de LTE son las mayores velocidades obtenidas, mayor número de usuarios, reducir retardos en las conexiones, reducir los tiempos de latencia, mejorar la cobertura disponible y permitir el uso de aplicaciones con mayor demanda de datos.

LTE Advanced o 4G+ es la última generación de transición disponible. Tiene una capacidad máxima de 1 Gbit/s en descarga y 500 Mbit/s en subida. En la actualidad ningún dispositivo móvil es capaz de obtener dicha velocidad en un entorno real. En condiciones óptimas y con los eNodeBs más rápidos se alcanza entre 300 Mbit/s y 600 Mbit/s, siendo lo normal alrededor de 200 Mbit/s. Este tipo de red aún se encuentra poco extendida en España, estando disponible sólo en los grandes núcleos urbanos.

El futuro de las comunicaciones móviles aún no está definido, pero todo parece indicar que apunta a la quinta generación 5G, con unas velocidades superiores a 1Gbit/s con predicción de estar disponible en 2020 tanto en Corea del Sur como en Japón durante los juegos olímpicos.

## 2.2 Requisitos LTE

La ITU se encarga de establecer los requisitos necesarios para que una arquitectura de red pertenezca a dicha categoría. Establece las siguientes condiciones respecto a LTE para la versión 8 [6]. A continuación se definen los requisitos de esta versión ya que es la empleada en el simulador de este proyecto.

### 2.2.1 Eficiencia

La eficiencia, rendimiento, velocidad de transmisión o throughput del inglés, se calcula como los bits por símbolo que el sistema es capaz de transmitir. Tomando como ejemplo un sistema con la mejor configuración posible, es decir, MIMO 4x4 a 20 MHz con una modulación 64 QAM, tendríamos  $12 \times 7 \times 2 = 168$  símbolos por ms, multiplicado por 100 bloques 16.8 Mbps, luego la cifra se vuelve a multiplicar por los 6 bits por símbolo de la 64 QAM y 4 de las 4 antenas. Finalmente se obtiene un valor máximo de 403.2 Mbps. Posteriormente la eficiencia efectiva se obtiene de restar un 25% empleado para la señalización, obteniendo así un valor alrededor de los 300 Mbps de bajada. [7]

Repitiendo el proceso anterior se obtiene una eficiencia efectiva de 75 Mbps de subida. [7]

### 2.2.2 Ancho de banda

LTE tiene un ancho de banda adaptable, en concreto puede operar a 1,4; 3; 5; 10; 15 o 20 MHz. Cuanto mayor es el ancho de banda, se obtiene una mayor velocidad de transmisión de datos.

### 2.2.3 Frecuencia

LTE puede operar con diferente espectro de frecuencia o bandas de frecuencia. Bien usando la duplexación por división de frecuencia (FDD) o usando una sola frecuencia, la duplexación por división de tiempo (TDD). Las frecuencias más comunes son 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz y 2600 MHz.

### 2.2.3 Eficiencia espectral

LTE con un sistema de antenas MIMO 4x4 y un ancho de banda de 20 MHz, consigue una velocidad máxima de bajada en torno a los 300 Mbps y una velocidad máxima de subida alrededor de los 75 Mbps. O lo que equivale a unos valores de eficiencia espectral de 15 bit/(s Hz) para la bajada y 3,75 bit/(s Hz) para la subida.



### 2.2.4 Velocidad de movimiento

LTE está optimizado para que los UEs se desplacen a unas velocidades entre 0 y 15 km/h. Sin embargo LTE es capaz de mantener la conexión con velocidades de movimiento máximas a 500 km/h, bastante útil en entornos como trenes de alta velocidad.

### 2.2.5 Cobertura

Un eNodeB en condiciones ideales, espacio abierto, un ancho de banda de 20 MHz y una frecuencia de 800 MHz es capaz de proporcionar una eficiencia de 1 Mbps a 30km, aproximadamente. Sin embargo, en LTE para garantizar una buena eficiencia, lo común es instalar eNodeBs cada 8 km en entornos rurales y eNodeBs cada 500 m en entornos urbanos. A fecha de hoy, existen 148 países con LTE disponible y 10 países más con intención de proporcionar cobertura. [8]

## 2.3 Técnicas de acceso múltiple

Respecto a las técnicas de acceso múltiple por división de frecuencia, empleadas en LTE, se dividen en dos técnicas: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple) utilizada en el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier Division Multiple Access) empleada en el enlace ascendente.

### 2.3.1 OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDMA es una técnica de acceso múltiple empleada en el enlace descendente (Downlink), es una pequeña variación respecto a OFDM que permite multiusuario. OFDM en LTE consiste en multiplexar un canal dividiéndolo en un máximo de 2048 subportadoras espaciadas a 15 kHz. Aunque los dispositivos móviles tienen que ser capaces de recibir las 2048 subportadoras, la estación base sólo necesita ser capaz de transmitir 72 subportadoras. [9]

Una de las ventajas de emplear OFDM es evitar los retrasos en los multitrayectos o ISI (Interferencia Intersimbólica), mediante la introducción de un prefijo cíclico. Otra ventaja es asociar cobertura a una determinada frecuencia, proporcionando cobertura donde antes no la había. Y por último, modulación adaptable QPSK = 4QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM.

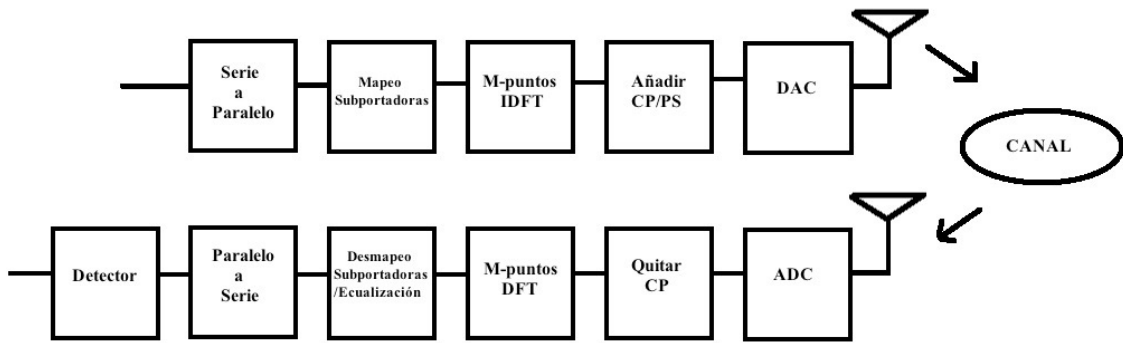


Figura 1. Estructura de un transmisor y receptor OFDMA

En la figura 1 se puede ver la estructura completa de un sistema OFDMA.

### 2.3.2 SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access

SC-FDMA es la técnica de acceso múltiple empleada para el enlace ascendente (Uplink). Como se puede observar en la Figura 1 y 2, la estructura es bastante similar a OFDMA. Una de las principales razones de no emplear OFDM es el consumo de la batería, aunque en las estaciones base esto no es un problema, en los dispositivos móviles hay que tenerlo en cuenta. SC-FDMA mantiene la resistencia a las interferencias multitrayecto y es flexible a la hora de alojar las frecuencias de las subportadoras al igual que OFDM, pero en cambio tiene un PAPR (Peak-To-Average Power Ratio) bajo lo que determina un consumo menor.

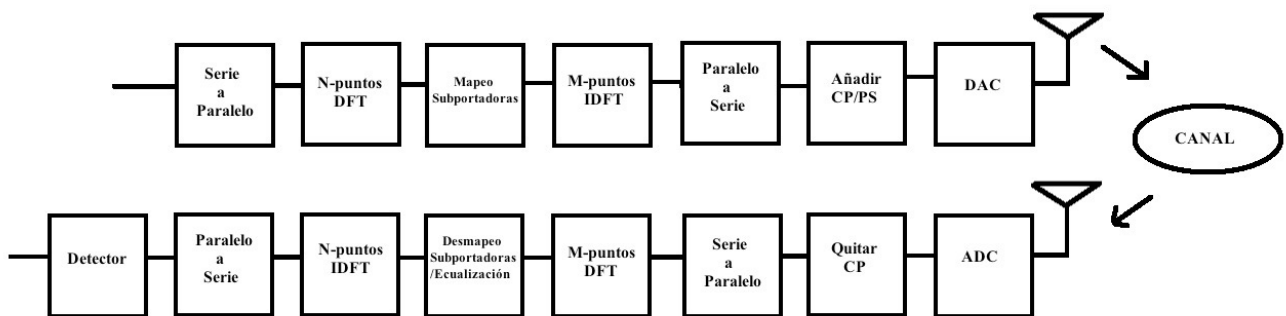


Figura 2. Estructura de un transmisor y receptor SC-FDMA

## 2.4 Flexibilidad de espectro

Una de las características principales de LTE es que debe funcionar tanto en modo FDD como TDD. La diferencia consiste en que FDD realiza la transmisión entre una estación base y un terminal móvil en un mismo tiempo, pero con diferentes frecuencias, mientras que TDD utiliza la misma frecuencia pero diferentes intervalos de tiempo. [10]

Aunque ambas tecnologías pueden ser empleadas en LTE, actualmente FDD se encuentra más extendida en LTE. El simulador empleado en este proyecto se basa en este modo de funcionamiento, por tanto las explicaciones serán más exhaustivas para dicho modo.

A continuación en la figura 3 [10, traducida] se puede observar la estructura de una trama en LTE, en concreto corresponde a una estructura tipo 1 para una trama FDD. La trama se divide en 20 slots de 0.5 ms o 10 subtramas de 1 ms, 10 slots corresponden al enlace de bajada y los otros 10 slots corresponden al enlace de subida. A su vez cada slot contiene 6 o 7 pequeños bloques denominados símbolos, dependiendo si tenemos prefijo cíclico extendido o prefijo cíclico normal, respectivamente.

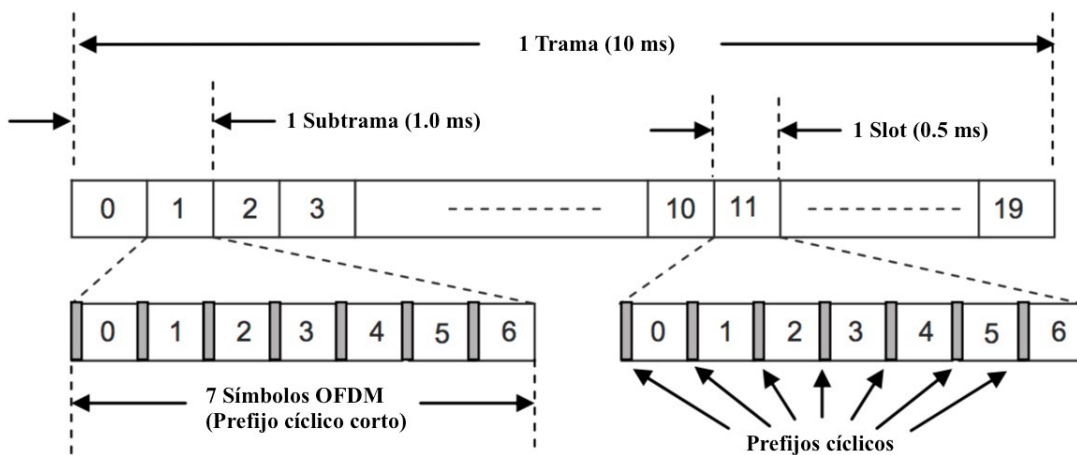


Figura 3. Estructura de una trama en LTE

Por otra parte en el dominio de la frecuencia el espacio entre subportadoras es de  $\Delta f = 1/T_u = 15$  kHz formando grupos de 12 subportadoras y ocupando un ancho de banda de 180 kHz.

## CAPÍTULO 2: LTE

Un bloque de recursos (RB) es un recurso físico formado por 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia y un slot de 0,5 ms en el dominio del tiempo. Por otra parte, 12 subportadoras x 7 símbolos = 84 elementos de recursos (RE) que constituyen un bloque de recursos (RB) cuando se emplea un prefijo cíclico normal. En caso de emplear prefijo cíclico extendido, el RB estará compuesto por 72 elementos de recursos.

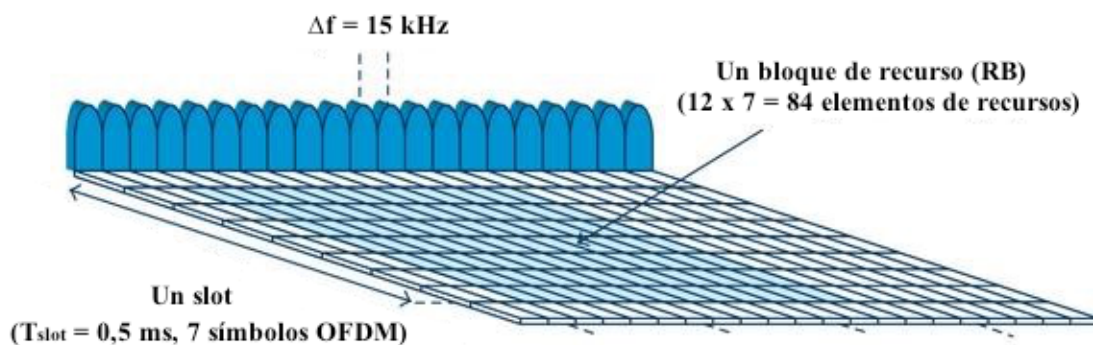


Figura 4. Estructura de un bloque de recursos (RB)

El número de bloques de recursos (RB) necesarios en un sistema viene determinado por el ancho de banda empleado, siendo este el resultado de la división del ancho de banda ocupado respecto al ancho de banda que ocupan las 12 subportadoras. El número de bloques de recursos para cada ancho de banda se puede ver en la Tabla 2. [11]

Número de RBs				
Ancho de Banda (MHz)	Número de RBs	Número de IFFT	Ancho de Banda Ocupado	Número de Subportadoras
1,4	6	128	1,08	72
3	15	256	2,7	180
5	25	512	4,5	300
10	50	1024	9	600
15	75	1536	13,5	900
20	100	2048	18	1200

Tabla 2. Número de RBs necesarios para cada ancho de banda

## 2.5 Canales físicos de bajada y subida

Las tramas en LTE tienen canales físicos y señales físicas. Los canales transportan información recibida de las capas superiores. Las señales se originan en la capa física. La estructura de la trama es común tanto para el canal de bajada (Downlink) como para el canal de subida (Uplink), sin embargo las señales físicas y los canales físicos son diferentes. [12]

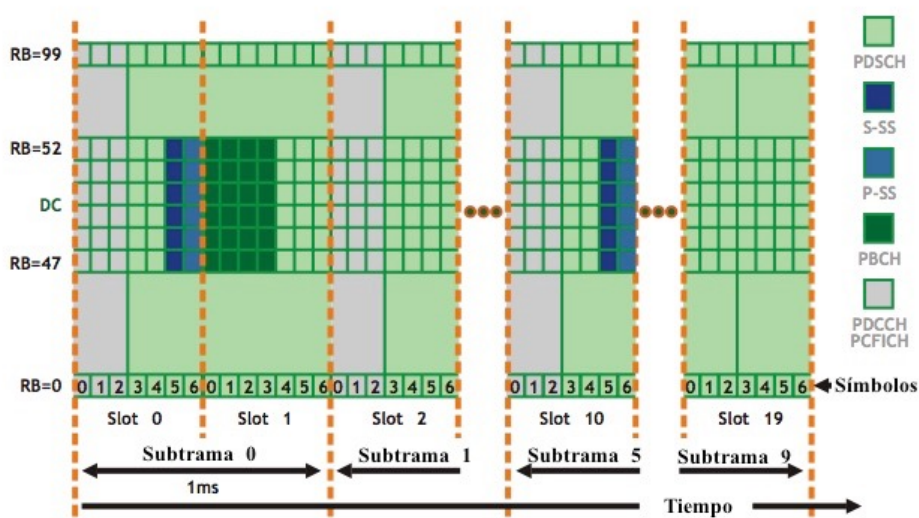


Figura 5. Diagrama de una trama Downlink

En la Figura 5 [12, traducida] se puede observar el diagrama de una trama de un enlace de descarga, usando FDD con un prefijo cíclico normal. Muestra varios de los canales y señales enumerados a continuación:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) - Canal que se emplea para transportar datos a alta velocidad. Modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
- PBCH (Physical Broadcast Channel) - Canal que envía cada 40 ms identificación del sistema de celdas y parámetros de acceso de control usando QPSK.
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) - Canal con valores 1 a 3, indican el número de símbolos OFDM que contiene la información de PDCCH.
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - Canal que asigna a los UEs los recursos de Downlink y Uplink.

## CAPÍTULO 2: LTE

- PMCH (Physical Multicast Channel) - Canal que transporta la información multidifusión.
- PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) - Canal que lleva los ACK/NAKs en respuesta a las transmisiones de Uplink. Permiten a los UEs determinar la respuesta al impulso del canal (CIR).
- RS (Reference Signal) - Es la señal de referencia que emplean los UEs para la estimación del canal de Downlink.
- P-SS y S-SS (Primary & Secondary Synchronization Signal) - Los UEs emplean la P-SS para la adquisición de la frecuencia y el tiempo durante la búsqueda de celda. En cambio los S-SS son usados para la búsqueda de celdas.

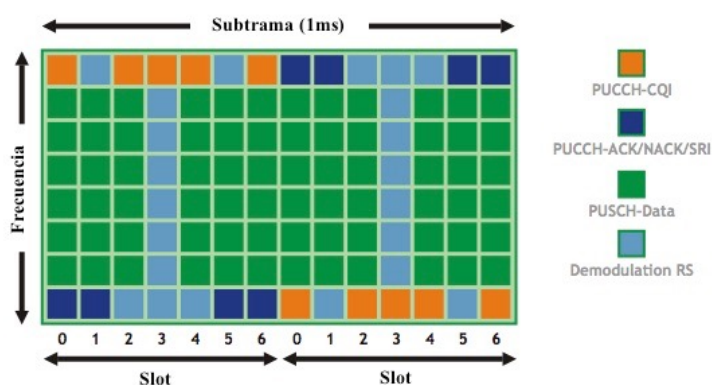


Figura 6. Diagrama de una trama Uplink

En la figura 6 [12, traducida] se puede observar el diagrama de una trama Uplink con algunos de los diferentes canales y señales que se enumeran a continuación.

- PUCCH (Physical Uplink Control Channel) - Canal que transmite la información de control como CQI, ACK/NACK. Nunca se usa de manera simultánea con PUSCH.
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) - Canal que se emplea para alojar los recursos de la subtrama basándose en un registro.
- PRACH (Physical Random Access Channel) - Canal que transporta acceso aleatorio, coordenadas y peticiones aleatorias de servicio de los dispositivos móviles.
- Uplink Reference Signal - Dos tipos de señales, una que facilita la demodulación coherente y otra que facilita la frecuencia al programador (planificador).

## 2.6 Modos de transmisión

LTE emplea diferentes modos de transmisión como MIMO para conseguir altas tasas de transmisión de datos. Sin embargo, también ofrece alternativas como TxD o SISO. Cada uno de ellos aúna unas características diferentes con más o menos posibilidades. Dependiendo de la versión LTE que se emplee, pueden ofrecer una mayor o menor tasa de transmisión de datos, usarse con un número de antenas, etc.

Modos de transmisión						
Modo	Versión LTE	Nombre	CQI	RI	PMI	Número de antenas
1	R8	SISO	X			1
2	R8	TxD	X			1 o 2
3	R8	OLSM	X	X		2 o 4
4	R8	CLSM	X	X	X	2 o 4
5	R8	Multiusuario - MIMO	X		X	2 o 4
6	R8	Rango - 1 CLSM	X		X	2 o 4
7	R8	Beamforming	X			1 o 2
8	R9	Doble Capa Beamforming	X	Configurable		2 o 4
9	R10	8 Capas Multiplexación Espacial	X	Configurable		2, 4 o 8

Tabla 3. Modos de transmisión

Algunos conceptos que conviene definir previamente antes de explicar los modos de transmisión son los siguientes:

1. Multiplexación espacial - Método que permite enviar diferentes flujos binarios por cada antena. La cadena de símbolos a transmitir se divide entre el número de antenas usadas en el transmisor, generando subcadenas de información. Las subcadenas se envían simultáneamente empleando la misma frecuencia. Las transmisiones se envían codificadas mediante codificación horizontal, codificación vertical V-BLAST o codificación diagonal D-BLAST.

2. CQI (Channel Quality Indicator) - Es un indicador de calidad del canal de transmisión. Se obtiene a partir del SNR, SINR o SNDR. Cuanto mayor sea el valor de CQI mejor es el canal.

3. RI (Rank Indicator) - Es un indicador que muestra como funciona una antena. Este valor será máximo cuando no haya interferencias entre las antenas, siendo un valor entre

## CAPÍTULO 2: LTE

2 y 4, lo cual indica que se podrán usar entre 2 y 4 antenas respectivamente. Cuando el valor sea 1 el UE percibirá las antenas como si fueran una sola.

4. PMI (Precoding Matrix Indicator) - Lo utiliza el UE para indicar al eNodeB que matriz de precodificación debería ser usada para la transmisión de bajada, a su vez determinada por el RI.

En la Tabla 3 [13] se puede ver un resumen de los modos de transmisión existentes y a continuación se encuentra su explicación más detallada [14].

- SISO (Single Input Single Output) - Es el modo de transmisión 1. Sólo emplea una antena tanto en transmisión como en recepción.
- TxD (Transmission Diversity) - Es el modo de transmisión 2. Es el modo MIMO predeterminado. Envía la misma información a través de varias antenas, por lo cual cada antena emplea diferentes codificaciones y diferentes frecuencias. Mejora el SNR y hace la transmisión más robusta. En LTE se emplea TxD cuando la multiplexación espacial no está disponible.
- OLSM (Open Loop Spatial Multiplexing) - Es el modo de transmisión 3. Este modo soporta multiplexación espacial con lazo abierto de 2 a 4 capas multiplexadas con 2 a 4 antenas respectivamente, para obtener las tasas de transferencia más altas posibles. No necesita tanto feedback por parte del UE ni tampoco emplear PMI. CLSM se emplea cuando no se tiene información del canal o el canal sufre cambios rápidos, v. gr. UEs que se mueven a gran velocidad.
- CLSM (Closed Loop Spatial Multiplexing) - Es el modo de transmisión 4. Este modo soporta multiplexación espacial de lazo cerrado con hasta 4 capas multiplexadas con hasta 4 antenas. Para permitir la estimación del canal en el receptor, eNodeB transmite varios RS distribuidos en varios RE y sobre varios periodos de tiempo. El UE manda la respuesta con la situación del canal indispensable para construir la PMI.
- Multiusuario - MIMO (Multiple Input Multiple Output) - Es el modo de transmisión 5. Similar a CLSM, también utiliza multiplexación espacial de lazo cerrado basada en un libro de codificación, sin embargo se dedica una capa para cada UE.

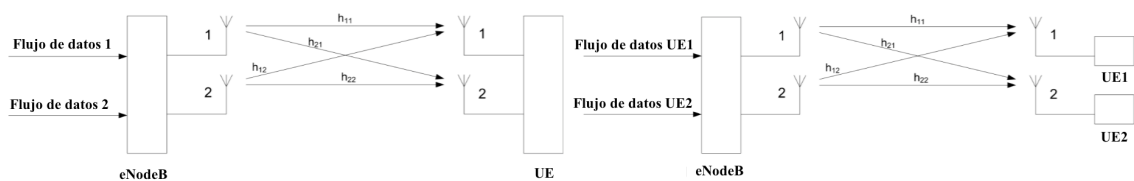


Figura 7. CLSM (izquierda) frente a MIMO (derecha)



- Rango - 1 CLSM - Es el modo de transmisión 6. Es un tipo de CLSM que sólo emplea una capa de transmisión. El UE estima el canal y envía el índice de la matriz PMI al eNodeB. Posteriormente el eNodeB envía la señal precodificada por todos los puertos de las antenas.
- Beamforming - Es el modo de transmisión 7. Este modo emplea señales de referencia RS específicas para el UE. Tanto los datos como los RS se transmiten usando las mismas ponderaciones de la antena. El UE sólo necesita el RS para la demodulación del PDSCH, además los datos recibidos son percibidos por el UE como si procedieran de una sola antena. Se conoce a este modo como “Antena de un único puerto - Puerto 5”. La transmisión aparentemente se realiza por un puerto “virtual”, puerto 5. Se pueden calcular los pesos del beamforming a través del ángulo DoA, estimación del canal, etc. LTE no restringe el uso de ninguno de esos cálculos.
- Doble Capa Beamforming - Es el modo de transmisión 8. Sólo disponible a partir de la versión 9 de LTE. Emplea beamforming de doble capa en los puertos 7 y 8 de la antena. Esto permite a la estación base tener dos capas en las antenas individualmente, permitiendo que el beamforming pueda ser combinado con multiplexación espacial para uno o más UEs.
- 8 Capas multiplexación espacial - Es el modo de transmisión 9. LTE lo añade en la versión 10. En este modo se pueden usar hasta 8 capas, es decir, permite usar hasta 8 antenas transmisoras, lo cual permite configuraciones MIMO 8x8. El número de capas usadas se puede definir dinámicamente. Se emplean los puertos virtuales de las antenas 7 a 14 y se puede emplear tanto un sólo usuario (SU) como multiusuario (MU) MIMO. Permite un cambio dinámico entre ambos modos. Las señales de referencia (RS) son similares a la versión 8. Los elementos de referencia son los mismos para los puertos 7,8, 11,12 y para 9, 10, 13, 14.

## 2.7 Modulación y codificación

La señal OFDM empleada en LTE permite un máximo de 2048 subportadoras diferentes espaciadas 15 kHz. Aunque para los dispositivos móviles es obligatorio tener la capacidad de recibir todas las subportadoras, no es así para la estación base que sólo necesita poder transmitir 72 subportadoras. De esta forma todos los dispositivos móviles se pueden comunicar con la estación base. La señal OFDM permite escoger entre tres posibles modulaciones para la señal de LTE.

**QPSK (4QAM)** - 2 bits por símbolo

**16QAM** - 4 bits por símbolo

**64QAM** - 6 bits por símbolo

## CAPÍTULO 2: LTE

La modulación exacta se escoge dependiendo de la calidad necesaria. Las modulaciones menores (QPSK) no necesitan una gran cantidad de SNR pero en cambio no son capaces de transmitir los datos tan rápido. Esto sólo se consigue con un gran SNR que sucede al emplear una modulación tipo QAM, ya que tienen una eficiencia espectral mayor. [9]

<b>Tabla modulación y codificación</b>			
<b>Índice CQI</b>	<b>Modulación</b>	<b>ECR</b>	<b>Eficiencia Espectral (bit/símbolo)</b>
1	QPSK	0,08	0,15
2	QPSK	0,12	0,23
3	QPSK	0,19	0,38
4	QPSK	0,30	0,60
5	QPSK	0,44	0,88
6	QPSK	0,59	1,18
7	16-QAM	0,37	1,48
8	16-QAM	0,48	1,91
9	16-QAM	0,60	2,41
10	64-QAM	0,46	2,73
11	64-QAM	0,55	3,32
12	64-QAM	0,65	3,90
13	64-QAM	0,75	4,52
14	64-QAM	0,85	5,12
15	64-QAM	0,93	5,55

*Tabla 4. Esquema de modulación, ECR y eficiencia para cada indicador de calidad del canal en LTE*

En la tabla 4 se muestra la relación entre las diferentes modulaciones, los índices de calidad asociados, la eficiencia espectral y la tasa de codificación efectiva.

## 2.8 Estimación del canal

Con el fin de estimar el canal, los sistemas LTE usan señales piloto llamadas señales de referencia. Cuando se usan prefijos cíclicos (CP) cortos, éstos son transmitidos durante el primer y quinto símbolo OFDM de cada slot. Cuando se emplean prefijos cíclicos (CP) largos, éstos son transmitidos a través del primer y cuarto símbolo OFDM de cada slot.

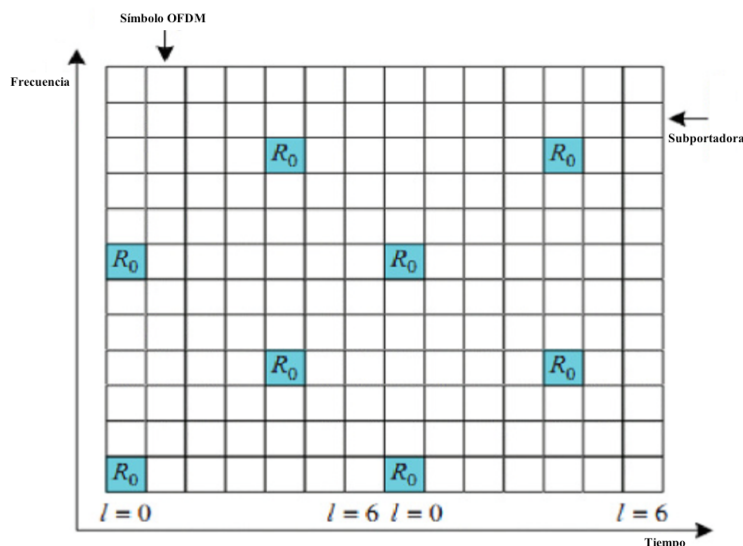


Figura 8. Estructura de una señal de referencia de descarga en un puerto de la antena

De [15], las señales piloto recibidas se pueden escribir como:

$$Y_p = X_p H_p + \mu_p$$

(.p) denota las posiciones donde las señales de referencia son transmitidas.

El empleo de estas señales piloto se asemeja al proceso de muestreo, el cual mediante la reconstrucción con señales anteriores, se obtiene la respuesta completa del canal. Existen diferentes técnicas para estimar todo el canal, las dos más empleadas son las siguientes:

- LS (Least Squares) - Es una técnica basada en calcular las estimaciones en las posiciones piloto, para posteriormente combinar los símbolos pilotos transmitidos con los recibidos, minimizando el error cuadrático entre ellos. No necesita conocer las características del canal.

- MMSE (Minimum Mean Square Error) - Es una técnica basada en la estimación mediante las propiedades estadísticas del canal y las del ruido que se ha calculado previamente por el receptor.

## 2.9 Planificadores

Un planificador o más frecuentemente del inglés, scheduler, es un programa encargado de controlar la asignación de los recursos compartidos tiempo-frecuencia entre todos los usuarios en cada instante de tiempo. El planificador se encuentra situado en la estación base y asigna recursos tanto en subida como en descarga. Existen diferentes tipos de planificadores en LTE, según se quieran asignar más o menos recursos a los diferentes UEs de manera equitativa, por prioridades, de la manera más rentable, etc. A continuación se describen todos los planificadores implementados en la versión 1.6 del simulador a nivel de sistema empleado en este proyecto.

### 2.9.1 Round Robin

Es un tipo de planificador encargado de asignar los recursos físicos a los UEs de manera equitativa. La principal ventaja de este planificador es que todos los UEs reciben el mismo número de recursos según los van solicitando. Aparte es un planificador sencillo de implementar, por eso un gran número de sistemas lo emplean. [16]

### 2.9.2 Best CQI

Es un tipo de planificador que se encarga de asignar cada recurso físico (RB) al UE con las mejores condiciones de canal. Para realizar la planificación, los terminales móviles mandan el CQI a la estación base (BS). Básicamente en el enlace de descarga, la BS transmite una señal de referencia a los terminales que es usada para medir el CQI. Mejor CQI significa mejores condiciones de canal. Mencionar que con este planificador es bastante probable que los terminales remotos se queden sin recursos. [16]

### 2.9.3 Prop Fair Sun

Es un tipo de planificador que asigna los recursos de manera proporcional. Estos recursos se asignan siguiendo los mismos principios que en “Reduced-Complexity Proportional Fair Scheduling for OFDMA Systems” por Z. Sun, C. Yin y G. Yue. [16]

Una planificación  $P$  es proporcionalmente justo, si y sólo si, para cualquiera de las planificaciones  $S$  viables, satisface:

$$\sum_k \frac{T_k^{-(S)} - T_k^{-(P)}}{T_k^{-(P)}} \leq 0$$

donde  $T_k^{(S)}$  es la tasa media de un usuario  $k$  por el planificador  $S$ . Para que estas condiciones sean necesarias y suficientes para un planificador multiportador, la ecuación anterior debe derivarse. [17]

## 2.9.4 FFR

Es un tipo de planificador que permite implementar un planificador para FR (Frequency Reuse) y otro para PR (Partial Reuse) de manera independiente. Para ello se debe seleccionar como planificador principal FFR (Fractional Frequency Reuse) y los otros dos planificadores FR y PR, entre uno de los otros siete planificadores definidos en este texto. [16]

## 2.9.5 Alpha Fair

Es un tipo de planificador que asigna mediante un coeficiente más prioridad a unos UEs que a otros. Mediante el ajuste de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  se consigue asignar mayor prioridad a los UE con mejores condiciones de canal sin mermar la capacidad total del resto de UEs. Para ello emplea la siguiente función de prioridad.

$$P = \frac{T^\alpha}{R^\beta}$$

donde,

T - Velocidad de los datos asumible por la estación en el slot de tiempo presente.

R - Histórico de la velocidad de los datos en esa estación.

$\alpha$  y  $\beta$  - Coeficientes de “justicia” del planificador.

En el caso concreto del simulador, el coeficiente  $\beta$  es igual a 1 y el coeficiente  $\alpha$  es el que se puede modificar. Cuando  $\alpha$  tienda a 0 el planificador actuará de forma similar a un planificador tipo Round Robin, mientras que cuando  $\alpha$  tienda a 1 el planificador asignará mayor prioridad a los UEs con mejores condiciones de canal. [18]

### **2.9.6 Max Min**

Es un tipo de planificador que se encarga de maximizar la eficiencia de un UE cuando ésta es mínima, dado a que las condiciones de canal no son favorables. Este incremento será llevado a cabo sólo si es factible y dicho incremento producirá un decremento de la eficiencia igual o menor en otro UE. [17]

### **2.9.7 Max Throughput**

Es un tipo de planificador que se encarga de maximizar la eficiencia de un UE, otorgándole la mayor cantidad posible al UE que tenga las mejores condiciones de canal. De esta manera se consigue desperdiciar la menor eficiencia posible y optimizar la red, pero por consiguiente existe el riesgo de que haya UEs que obtengan una eficiencia muy pequeña o directamente no tengan. [19]

### **2.9.8 Resource Fair**

El planificador de Resource Fair trata de maximizar la tasa de velocidad de todos los UEs mientras garantiza que se reparten justamente los distintos RBs entre los UEs. [17]

### **2.9.9 Constrained**

Es un tipo de planificador que asegura un índice de justicia para cada TTI, el proceso de otorgar recursos a un usuario no produce inanición para el resto de usuarios. Esto se comprueba de manera computacional mediante el número de recursos asignados a cada usuario en los últimos TTIs. Formulado de la siguiente manera. [20]

$$\rho = 1 - \frac{RB_i}{N\_RB}$$

# Capítulo 3

## Simulador LTE

### 3.1 Introducción al simulador

Dado el creciente aumento de las tecnologías que emplean las redes móviles ya sean Smartphones, Tablets, portátiles, Wearables, coches conectados, viviendas domóticas, etc. Se hace más necesario que nunca el uso de simuladores para estudiar el comportamiento teórico de los diferentes dispositivos, usando redes móviles en diferentes escenarios, para así obtener aproximaciones de lo que podría suceder en la realidad.

Existen multitud de simuladores para el estudio de las redes móviles, con mayor y menor complejidad, con los cuales se pueden medir más o menos parámetros. De los cuales algunos funcionan sólo en ciertos sistemas operativos. O solamente están centrados en unas características concretas como puede ser, mostrar zonas de cobertura, emplear turbo-códigos, planificación estructural de la red, etc. Por estas razones se ha decidido centrar este proyecto en un simulador versátil como es el de la Universidad de Viena, el cual funciona en Matlab ergo se puede emplear en la mayoría de los sistemas operativos actualmente usados, es gratuito, no requiere equipos demasiado potentes para su ejecución y permite el estudio de multitud de características.

La universidad de Viena ofrece dos simuladores con dos enfoques diferentes, el primero se basa en una simulación a nivel de enlace mientras que el segundo ofrece simulación a nivel de sistema [21]. Ambos se encuentran definidos en los párrafos posteriores, sin embargo para el estudio de una red LTE es más conveniente el uso de un simulador a nivel de sistema, dado que tiene características más interesantes para grandes redes, con lo cual es el escogido en este proyecto y con el que se continuará trabajando a partir del punto 3.2.

### 3.1.1 Simulador a nivel de enlace < System Link >

Un simulador a nivel de enlace generalmente suele analizar el comportamiento entre una estación base y un único usuario. El simulador a nivel de enlace de la universidad de Viena se divide a su vez en dos versiones, una para el enlace descendente y otra para el enlace ascendente, además ambas versiones permiten multi-celda y multi-usuario.

Es un tipo de simulador enfocado principalmente a la investigación de problemas como las ganancias de sistemas MIMO, modulación adaptativa y feedback en la codificación (AMC), modelado del canal para codificación y decodificación o modelado de las capas físicas de las simulaciones a nivel de sistema.

El simulador a nivel de enlace se puede dividir en tres bloques básicos, transmisor, modelo de canal y receptor. Dependiendo del tipo de simulación se emplea uno o varios bloques. Los bloques del transmisor y del receptor están ligados al modelo de canal, el cual se emplea para transmitir los datos de descarga, se asume que la señalización y el feedback de subida no tienen errores. Las funciones de los diferentes bloques se definen a continuación:

**Transmisor** - Se encarga de transmitir la señal y la señalización. Para ello se basa en los valores del feedback del UE, mediante los cuáles un algoritmo de planificación asigna bloques de recursos (RBs) a los UEs con el MCS adecuado, los modos de transmisión MIMO, TxD, OLSM o CLSM y la precodificación/número de capas espaciales para los usuarios servidos.

**Modelo de canal** - El simulador asigna el tipo de canal empleado. Se puede usar alguno de los siguientes canales: Ruido Aditivo Gaussiano Blanco (AWGN), Flat Rayleigh Fading, modelos basados en retardo de potencia como ITU Peatón B o ITU vehicular A y finalmente el modelo más sofisticado Winner Phase II+.

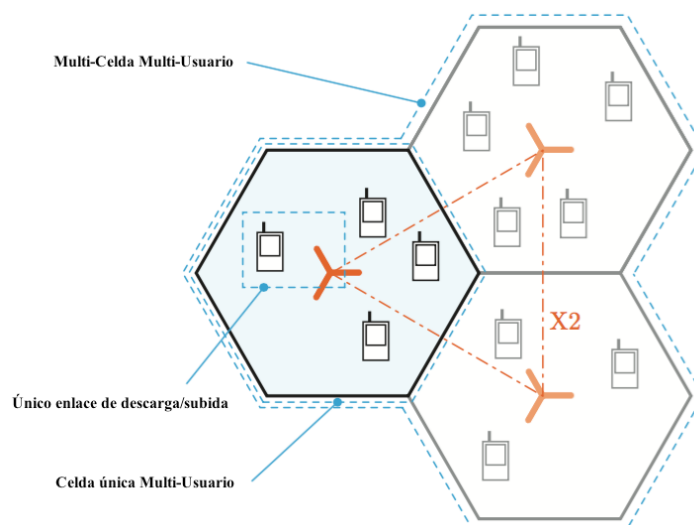


Figura 9. Posibles escenarios del simulador LTE a nivel de enlace [21]



**Receptor** - Se encarga de proporcionar el feedback del usuario, los bits de datos decodificados, el BLER y la eficiencia. Para ello desmonta los RBs de acuerdo a la colocación de los UEs, detección OFDM y posterior comprobación de errores mediante LMMSE.

El simulador a nivel de enlace, tanto la versión de enlace de bajada como la versión de enlace de subida, pueden funcionar en diferentes escenarios. Como se ve en la Figura 9 el simulador se puede utilizar de tres formas, con un único usuario y una estación base, varios usuarios y una estación base o con varias estaciones base y varios usuarios.

### 3.1.2 Simulador a nivel de sistema < System Level >

En los simuladores a nivel de sistema se analiza el comportamiento de toda la red. En LTE, tal red consiste en un conjunto de eNodeBs que cubren un área específica en la cual se encuentran varios terminales móviles estáticos o en movimiento. Se utiliza principalmente para planificar la colocación de celdas a gran escala, la planificación y para medir las interferencias. Dada la complejidad computacional que supondría el uso de simuladores a nivel de enlace se utilizan modelos simplificados.

El simulador a nivel de sistema implementado por la universidad de Viena se puede descomponer en dos partes principales. En la figura 10 se puede ver un esquema completo con todos sus bloques.

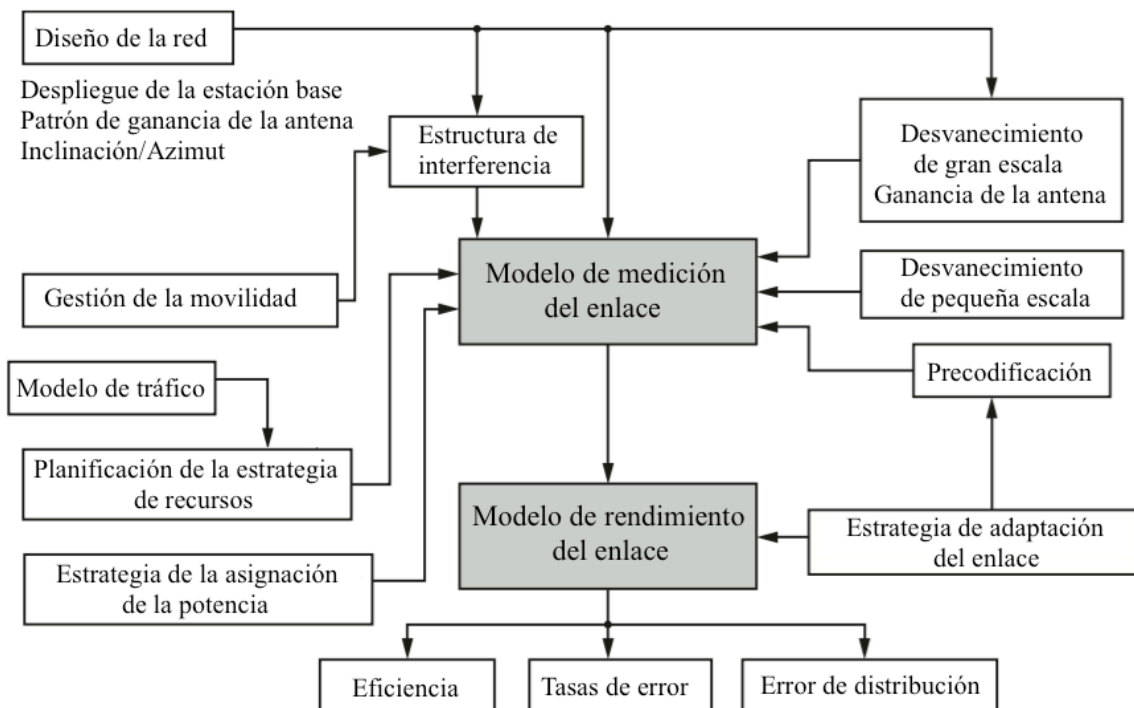


Figura 10. Diagrama esquemático de bloques de un simulador a nivel de sistema [21]

**Modelo de medición del enlace** - Es la parte del simulador que refleja la calidad del enlace, viene dada por los informes de medidas de los UEs, es necesaria conocerla para la adaptación del enlace y la asignación de recursos. Basándose en el SINR, el UE computa el feedback (PMI, RI y CQI), que es empleado por el eNodeB para la adaptación del enlace. Por otra parte los algoritmos de los planificadores asignan recursos a los usuarios para optimizar el rendimiento del sistema.

**Modelo de rendimiento del enlace** - Basándose en la información proporcionada por el modelo de medición del enlace como el SINR del receptor y los parámetros de transmisión (modulación y codificación), el modelo de rendimiento del enlace es capaz de predecir el BLER del enlace.

Una de las metas de los simuladores a nivel de sistema es poder pre-calcular el mayor número de parámetros de simulación posibles, con ello consigue reducir la carga computacional utilizando escenarios calculados anteriormente. Los cálculos previos en el simulador a nivel de sistema requieren la generación de mapas dependientes de eNodeB a gran escala sin pérdida de camino, mapas dependientes del lugar con desvanecimiento de gran escala y trazas dependientes del tiempo con desvanecimiento de pequeña escala para cada pareja de eNodeB-UE. [16]

### 3.2 Estructura general del simulador

El simulador a nivel de sistema tiene una estructura compleja. Posee multitud de parámetros que se pueden configurar, tanto parámetros de entrada como parámetros de salida. Estos parámetros incluyen todo lo relacionado con los eNodeBs y los UEs, tipo de red, canal empleado, desvanecimiento de gran escala, desvanecimiento de pequeña escala, pérdidas, entorno de transmisión, datos a guardar, gráficas mostradas, etc.

En la figura 11 de la página contigua se muestra la estructura simplificada del simulador completo. En ella se puede ver de una manera más intuitiva las posibilidades que ofrece el simulador. En el lateral izquierdo se definen las opciones globales como el tipo de simulación. En el lateral derecho se representa el esquema con los puntos que afectan directamente a los eNodeBs y UEs.

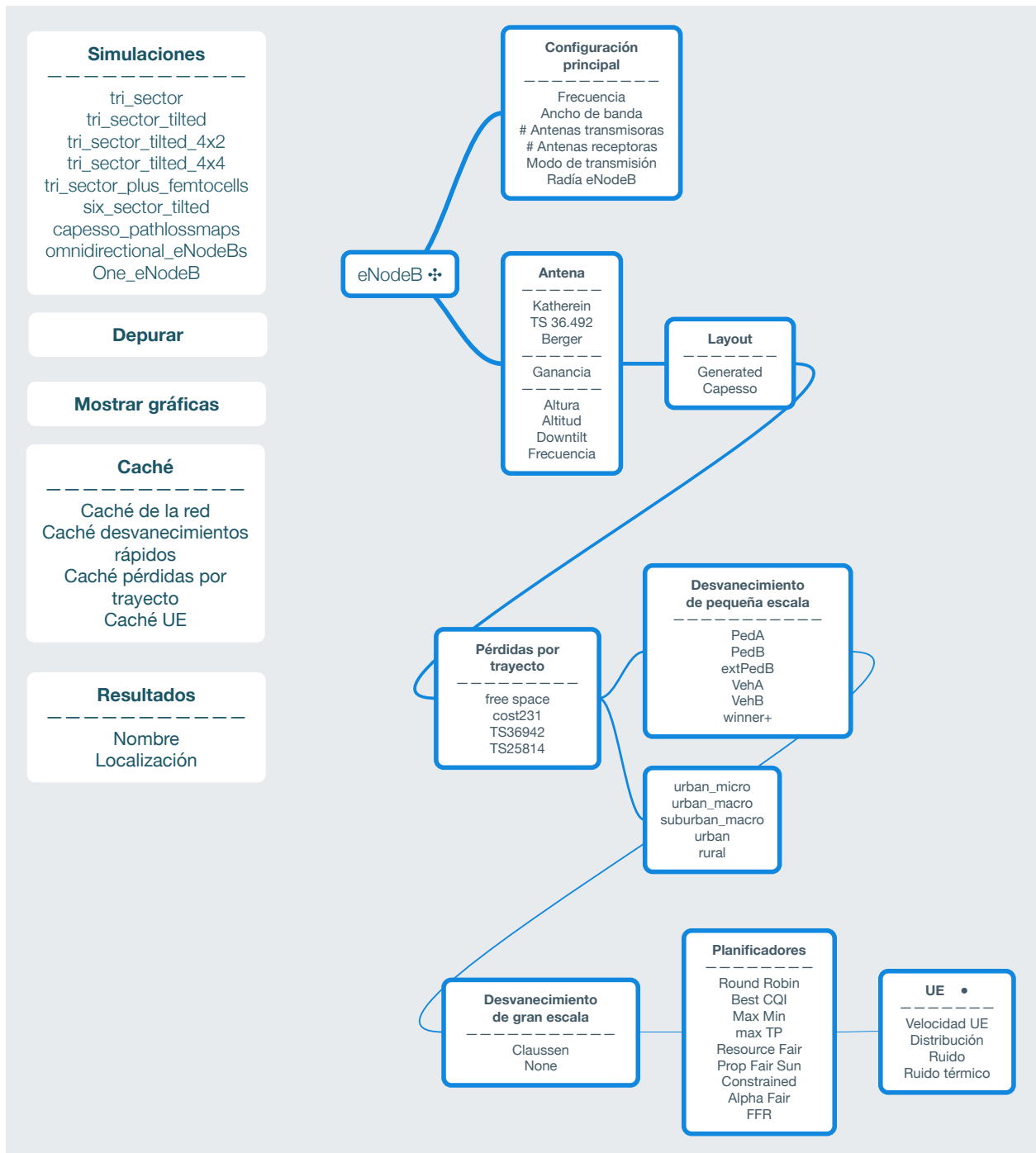


Figura 11. Estructura completa del simulador

## 3.3 Características principales

El simulador a nivel de sistema posee multitud de características a elegir por el usuario, todas ellas se pueden configurar mediante parámetros que se definen en las diferentes funciones.

Junto al simulador se incluye una pequeña guía de referencia con una escueta explicación de la mayoría de los parámetros que se pueden configurar, sin embargo en este apartado se pretende definir dichos parámetros de una forma más extensa y comprensible. [16]

### 3.3.1 Configuraciones de simulaciones

El simulador provee diferentes configuraciones de simulaciones ya implementadas, los ficheros se encuentran en una carpeta llamada *+simulation\_config*. Los ficheros se cargan a través de la función *LTE\_load\_params*. Todos los parámetros de las simulaciones son modificables, incluidos los pertenecientes a la función *One\_eNodeB* desarrollada para este proyecto. La única configuración no modificable es la red *capesso*.

- **tri\_sector** - Simulación que genera un tipo de red en la cual los eNodeBs se encuentran divididos en 3 sectores.
- **tri\_sector\_tilted**, **tri\_sector\_tilted\_4x2**, **tri\_sector\_tilted\_4x4** - Simulación similar a la anterior con la diferencia que se emplean configuraciones diferentes en las antenas, SISO y MIMO.
- **tri\_sector\_plus\_femtocells** - Simulación que también genera una red de eNodeBs divididos en 3 sectores pero con femtoceldas anexionadas.
- **six\_sector\_tilted** - Simulación que genera un tipo de red en la cual los eNodeBs se encuentran divididos en 6 sectores.
- **capesso\_pathlossmaps** - Simulación que genera una red tipo *capesso* que proviene de los datos extraídos de las redes de operadores móviles de Viena, se introdujo con el fin de poder realizar comparaciones.
- **omnidirectional\_eNodeBs** - Simulación que genera una red en la cual los eNodeBs poseen antenas omnidireccionales.
- **One\_eNodeB** - Simulación creada para este proyecto la cual sólo simula un único eNodeB con 3 sectores.

## CAPÍTULO 3: SIMULADOR LTE

En los puntos posteriores de este capítulo se explica como modificar los diferentes parámetros de configuración. Éstos se pueden modificar directamente dentro de cada fichero de simulación, los definidos en las líneas previas o añadiendo la línea de código deseada en el ejecutable, generalmente *LTE\_sim\_main\_launcher\_examples*.

```
simulation_type = 'One_eNodeB';

% Possible simulation types now:
% - 'tri_sector'
% - 'tri_sector_tilted', 'tri_sector_tilted_4x2', 'tri_sector_tilted_4x4'
% - 'tri_sector_plus_femtocells'
% - 'six_sector_tilted'
% - 'capesso_pathlossmaps'
% - 'omnidirectional_eNodeBs'
% - 'One_eNodeB'

LTE_config = LTE_load_params(simulation_type);
```

Figura 12. Diferentes tipos de simulaciones disponibles

### 3.3.2 Opciones de depuración

*LTE\_config.debug\_level* - Permite configurar la cantidad de información mostrada en el depuración de Matlab.

- 0 - No muestra información.
- 1 - Muestra información básica.
- 2 - Muestra información extendida.

La opción por defecto es 1 y es la más adecuada. La opción 2 no suele funcionar en muchas de las versiones del simulador, incluida la 1.6.

### 3.3.3 Opciones de representación

*LTE\_config.show\_network* - Permite configurar qué gráficas se muestran al ejecutar las simulaciones.

- 0 - No muestra gráficas.
- 1 - Muestra algunas gráficas como BLER, ganancia de la antena...
- 2 - Muestra todas las gráficas incluyendo las del movimiento de los UEs, puede retrasar la ejecución de la simulación.
- 3 - Muestra todas las gráficas incluyendo las generadas por el desvanecimiento de gran escala.

Por defecto las simulaciones vienen configuradas a 1.

### 3.3.4 Parámetros generales

Los parámetros generales son los siguientes:

*LTE\_config.frequency* - Frecuencia con la que el sistema opera, en Hz.

*LTE\_config.bandwidth* - Ancho de banda del sistema en Hz. Estos valores pueden ser 1,4MHz, 3 MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz que equivalen a 6, 15, 25, 50, 75 y 100 RBs respectivamente.

*LTE\_config.nTX* - Número de antenas transmisoras. Configurar según modo de transmisión. 1, 2 o 4.

*LTE\_config.nRX* - Número de antenas receptoras. Configurar según modo de recepción. 1, 2 o 4.

*LTE\_config.tx\_mode* - Modo de transmisión. Definidos en el capítulo 2.

- 1) Single antenna
- 2) Transmission Diversity (TxD)
- 3) Open Loop Spatial Multiplexing (OLSM), Spatial Multiplexing with Cyclic Delay Diversity (CDD)
- 4) Closed Loop Spatial Multiplexing (CLSM)
- 5) Multiuser-MIMO
- 6) Rank-1 CLSM (Sólo disponible en la v. 1.8)
- 9) Eight Layer Spatial Multiplexing (Sólo disponible en la v. 1.8)

*LTE\_config.always\_on* - Elegir *true* o *false* dependiendo si se desea que el eNodeB radie potencia o no.

### 3.3.5 Opciones de la generación de números aleatorios

Estas dos funciones permiten configurar el simulador para que repita la misma simulación. Es decir, para que los UEs se sitúen en las mismas posiciones aunque se varíen otros parámetros.

*LTE\_config.seedRandStream* - Valor *false* para que los UEs se sitúen en posiciones aleatorias, *true* para que los UEs se sitúen en una posición concreta.

*LTE\_config.RandoStreamSeed* - Definir un número entero entre 0 y  $2^{32}$  si en la función anterior se ha escogido el valor *true* para que la simulación se repita según ese patrón.

### %% Opciones generales

```
LTE_config.frequency      = 2.14e9;          % Frecuencia en Hz
LTE_config.bandwidth      = 20e6;           % Ancho de banda en Hz

LTE_config.nTX            = 2;             % Numero de antenas transmisoras
LTE_config.nRX            = 2;             % Numero de antenas receptoras
LTE_config.tx_mode        = 4;             % Modos de transmision

LTE_config.always_on      = true;          % Controla si un eNodeB radia potencia
```

Figura 13. Opciones generales de configuración

### 3.3.6 Tiempo de simulación

*LTE\_config.simulation\_time\_tti* - Indica la duración de la simulación en intervalos de tiempo de transmisión (TTI). Por defecto emplea un TTI de 10. Éste puede ser mayor o menor pero se tiene que escoger un valor mayor al retraso del canal que es 3.

*LTE\_config.latency\_time\_scale* - Se encarga de filtrar la media de la eficiencia del UE que el simulador registra mediante la fórmula definida en el manual LTEsystemDoc, apartado E. En esta función no hay que modificar ningún parámetro, la emplean los planificadores tipo “fair”.

### 3.3.7 Opciones de caché

Opciones para configurar caché, no confundir con las opciones para guardar resultados definidas más adelante.

*LTE\_config.cache\_network* - Sirve para guardar los eNodeBs generados, mapa de pérdidas y mapa de desvanecimiento de gran escala en un archivo *.mat*. Valor *true* tanto para leer los datos ya existentes o crear un archivo nuevo. Valor *false* para no guardar nada, es la opción más fidedigna ya que en simulaciones posteriores no mezcla datos.

*LTE\_config.network\_cache* - Sirve para asignar un nombre a la red de caché. Se recomienda dejar en *auto* para que lo genere automáticamente.

*LTE\_config.delete\_ff\_trace\_at\_end* - Sirve para eliminar las trazas del desvanecimiento de pequeña escala, ya que éstas ocupan bastante espacio si el valor *true* es seleccionado.

*LTE\_config.delete\_pathloss\_at\_end* - Sirve para eliminar las pérdidas por trayecto, ya que también ocupan bastante si el valor *true* es seleccionado.

*LTE\_config.UE\_cache* - Sirve para guardar las posiciones de los UEs generados seleccionando *true* o no seleccionando *false*.

*LTE\_config.UE\_cache\_file* - Sirve para asignar un nombre a la caché de la posición de los UEs. Se recomienda dejar en *auto* para que lo genere automáticamente.

*Nota* - Todos los archivos de caché se almacenan en la carpeta *data\_files*.

### 3.3.8 Distribución de la red y parámetros macroscópicos de las pérdidas por trayecto

*LTE\_config.network\_source* - Especifica el tipo de red que se quiere simular, pudiendo ser esta:

– *generated*: Red tipo rejilla hexagonal con los eNodeBs equiespaciados, con tres sectores cada uno.

– *capesso*: Red tipo Capesso con datos reales extraídos de información proporcionada por distintos operadores austriacos.

#### 1) Parámetros de la red *generated*:

*LTE\_config.inter\_eNodeB\_distance* - Sirve para indicar la distancia en metros entre los eNodeBs. Por defecto 500 m.

*LTE\_config.map\_resolution* - Sirve para indicar la resolución en pixeles frente a la distancia real de los eNodeBs en metros. Por defecto 5 m/pixel.

*LTE\_config.nr\_eNodeB\_rings* - Sirve para indicar el número de anillos que define a su vez el número de estaciones base. El número de estaciones base total viene definido por la siguiente fórmula.

$$\# eNodeBs = \left( \sum_{i=0}^{nr\_rings} 6 * (1 : i) \right) + 1$$

*LTE\_config.minimum\_coupling\_loss* - Sirve para indicar las pérdidas mínimas entre la estación base (BS) y el UE o entre el UE y el UE en el peor de los casos. Incluye la ganancia de las antenas y se recomienda 70 dB para zonas urbanas y 80 dB para zonas rurales.

*LTE\_config.macroscopic\_pathloss\_model* - Sirve para definir el modelo de pérdidas por trayecto macroscópico de entre los definidos a continuación. A su vez dependiendo del modelo de pérdidas elegido, se podrá escoger el medio en el que se encuentra mediante *LTE\_config.macroscopic\_pathloss\_model\_settings.environment*.

- *free space*: Pérdidas en espacio libre.



## CAPÍTULO 3: SIMULADOR LTE

- *cost231*: Modelo de pérdidas COST231 definido por la 3GPP. Con posibles entornos.

\* *urban micro*: Microceldas LOS y NLOS basadas en Walfish-Ikegami.

\* *urban macro*: Macrocelas urbanas basadas en el modelo de O. Hata.

\* *suburban macro*: Macrocelas suburbanas basadas en modelo O. Hata.

- *TS36942*: Modelo de pérdidas definido por la 3GPP. Con posibles entornos.

\* *urban*:  $L=40 + 14 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hb} \cdot \log_{10}(R) + 18 \log_{10}(D_{hb}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{dB}$

\* *rural*:  $L=69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f) + 13.82 \cdot \log_{10}(H_b) + (44.9 -$

$6.55 \cdot \log_{10}(H_b)) \log_{10}(R) + 4.78 (\log_{10}(f))^2 + 18.33 \cdot \log_{10}(f) + 40.94.$

Donde R es la separación entre BS y UE en km, f frecuencia en MHz, D<sub>hb</sub> altura de la BS en m desde el techo y H<sub>b</sub> la altura en m desde el suelo.

- *TS25814*: Modelo de pérdidas definido por la 3GPP con  $L = I + 37.6 \cdot \log_{10}(R)$  siendo I = 128.1 para 2 GHz e I = 120.9 para 900 MHz y R distancia UE-BS en m.

*LTE\_config.eNodeB\_tx\_power* - Potencia transmitida máxima del eNodeB en vatios siendo ésta entre 43 y 49dBm para 1,25 y 20MHz, respectivamente.

### 2) Parámetros de la red Capesso

Los parámetros de red tipo Capesso sólo influyen única y exclusivamente al tipo de simulación denominado *example\_capesso*. Por tanto estos parámetros sólo aparecen en este tipo de simulación, en el resto de ficheros de configuraciones de simulaciones no se hace mención a ellos y hay un espacio en blanco donde se menciona “Capesso”. Como ya se ha dicho anteriormente el caso Capesso proviene de datos extraídos de operadores de Viena, por tanto estos no se deben modificar ya que sirven meramente de ejemplo.

Los siguientes parámetros son los únicos que se deberían modificar, ya que la modificación del resto, es probable que conlleve el mal funcionamiento del simulador.

*LTE\_config.map\_resolution* - Sirve para indicar la resolución en pixeles frente a la distancia real de los eNodeBs en metros. Por defecto 5 m/pixel.

*LTE\_config.manually\_set\_ROI* - Sirve para especificar la región de interés (ROI), *false* significa usar la ROI por defecto y *true* que se quiere especificar.

*LTE\_config.rescale\_factor* - Si el valor anterior es *true*, aquí se debe especificar el valor de la ROI deseada.

*LTE\_config.capesso\_params.rx\_height* - Sirve para especificar la altura del UE respecto al suelo.

*LTE\_config.capesso\_params.use\_default\_tilt\_value* - Sirve para definir si hay inclinación en el lugar, *false* significa que no hay mientras *true* que si hay.

*LTE\_config.capesso\_params.default\_mechanical\_tilt* - Sirve para definir los grados de inclinación en caso de que se haya seleccionado *true* en la instrucción anterior.

*LTE\_config.capesso\_params.enable\_debug\_plotting* - Por defecto *false*, si se cambia a *true* muestra más gráficas de pedidas.

### 3.3.9 Desvanecimiento de gran escala

Estos parámetros sólo tienen sentido configurarlos para el tipo de red *generated*, en Capesso los importa de los datos disponibles.

*LTE\_config.shadow\_fading\_type* - Sirve para definir el tipo de desvanecimiento de gran escala.

- *claussen*: Genera desvanecimiento de gran escala con una lognormal distribuida 2D espacio correlada.

- *none*: No genera desvanecimiento de gran escala. Opción para *Capesso*.

*LTE\_config.shadow\_fading\_map\_resolution* - Sirve para definir la resolución del desvanecimiento de gran escala en metros/pixel.

*LTE\_config.shadow\_fading\_n\_neighbors* - Sirve para especificar el número de vecinos posibles que toma en cuenta el desvanecimiento de gran escala. Puede ser 4 u 8.

*LTE\_config.shadow\_fading\_mean* - Valor de la desviación media ( $\mu$ ) de la distribución lognormal. Por defecto 0.

*LTE\_config.shadow\_fading\_sd* - Valor de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la distribución lognormal. Por defecto 10.

*LTE\_config.r\_eNodeBs* - Valor de la correlación entre los lugares del desvanecimiento de gran escala. Por defecto 0,5.

### 3.3.10 Desvanecimiento de pequeña escala

A continuación se muestran los parámetros de desvanecimiento pequeña escala entre los eNodeBs y los UEs a los que sirven.

## CAPÍTULO 3: SIMULADOR LTE

*LTE\_config.channel\_model.type* - Sirve para indicar el modelo de canal que generan. Las opciones posibles son las siguientes:

- *PedA*: Canal de la ITU Peatón A.
- *PedB*: Canal de la ITU Peatón B.
- *extPedB*: Extension de la ITU para canales de sistemas OFDM de banda ancha.
- *VehA*: Canal de la ITU Vehicular A.
- *VehB*: Canal de la ITU Vehicular B.
- *winner+*: Modelo de canal para Winner II+ creado específicamente para Matlab.
- Otros: *'TU'*, *'HT'* y *'RA'* ligados más al simulador a nivel de enlace.

*LTE\_config.channel\_model.trace\_length* - Longitud del canal en segundos. Tener cuidado ya que lo carga en memoria.

*LTE\_config.channel\_model.correlated\_fading* - Seleccionar *true* o *false* según se quiere activar o no la correlación.

*LTE\_config.pregenerated\_ff\_file* - Sirve para especificar donde guardar las trazas. Elegir *auto* o una ruta concreta.

*LTE\_config.recalculate\_fast\_fading* - Fuerza a generar una nueva traza del canal aunque ya haya una si selecciona *true*, sino hay que elegir *false*.

### %% Desvanecimiento de pequeña escala

```
LTE_config.channel_model.type = 'winner+';  
% 'winner+' 'PedB' 'extPedB' 'PedA' 'VehA' 'VehB'  
LTE_config.channel_model.trace_length = 10; % Longitud del rastro (Segundos)  
LTE_config.channel_model.correlated_fading = true;  
LTE_config.pregenerated_ff_file = 'auto';  
  
LTE_config.recalculate_fast_fading = false; % True recalcula el rastro
```

Figura 14. Configuración del desvanecimiento de pequeña escala

### 3.3.11 Configuración de los UEs

*LTE\_config.UE.receiver\_noise\_figure* - Valor de ruido en el receptor en dB. Típicamente 9 dB.

*LTE\_config.UE.thermal\_noise\_density* - Valor de la densidad del ruido térmico en dBm/Hz.

*LTE\_config.UE\_distribution* - Permite configurar que distribución emplean los UEs. Las opciones son *'constant UEs per cell'*, *'traffic map'* y *'SLvsLL'*.

- *constant UEs per cell*: Número de UEs constantes. Se puede escoger la cantidad de UEs por cada celda asignando un valor a *LTE\_config.UE\_per\_eNodeB*.

- *traffic map*: Emplear con Capesso, hay que cargar los datos.

*LTE\_config.UE\_speed* - Sirve para configurar la velocidad a la que se mueven los UEs en m/s.

### 3.3.12 Configuración de los eNodeBs

*LTE\_config.antenna\_gain\_pattern* - Sirve para configurar el patrón de ganancia de la antena empleada por cada sector del eNodeB entre los siguientes, sólo válido para la red *generated*.

- *berger*:  $A(\theta) = -\min[12(\frac{\theta}{70^\circ})^2, 20dB], -180 \leq \theta \leq 180$

- *TS 36.942*:  $A(\theta) = -\min[12(\frac{\theta}{65^\circ})^2, 20dB], -180 \leq \theta \leq 180$

- *Omnidirectional*:  $A(\theta) = 0$

- *six-sector*:  $A(\theta) = -\min[12(\frac{\theta}{35^\circ})^2, 23dB], -180 \leq \theta \leq 180$

- *kathreinTSAntenna*: Se deben configurar los siguientes elementos con la hoja del catalogo. Esta antena pertenece al fabricante Ketherin.

\* *LTE\_config.site\_altitude*: Altura de la localización de la antena [m]

\* *LTE\_config.site\_height*: Altura de la estación base [m].

\* *LTE\_config.rx\_height*: Altura del UE [m].

\* *LTE\_config.antenna.mechanical\_downtilt*: Inclinación mecánica [°].

\* *LTE\_config.antenna.electrical\_downtilt*: Inclinación eléctrica [°].

\* *LTE\_config.antenna.kathrein\_antenna\_folder*: Ubicación de los ficheros.

\* *LTE\_config.antenna.file\_format*: Patrón de la antena, *msi* o *txap*.

\* *LTE\_config.antenna.antenna\_type*: Nombre de la antena, p. ej. '742212'.

\* *LTE\_config.antenna.frequency*: Frecuencia a usar en el diseño [MHz].

*LTE\_config.max\_antenna\_gain* - Valor de la ganancia en dBs. Se recomienda usar 15dBi (área rural 900 MHz, área urbana 2 GHz) o 12 dBi (área urbana 900 MHz).

### 3.3.13 Configuración de los planificadores

El funcionamiento de los diferentes tipos de planificadores que se pueden utilizar en el simulador son explicados en el punto 2.9 de este proyecto. Aquí sólo se explican las instrucciones para invocarlos.

## CAPÍTULO 3: SIMULADOR LTE

*LTE\_config.scheduler* - Sirve para escoger el planificador deseado entre 'round robin' 'best cqi' 'max min' 'max TP' 'resource fair' 'prop fair Sun' 'constrained' 'alpha fair' y 'FFR'.

*LTE\_config.scheduler\_params.fairness* - Valor del índice de justicia. Se recomienda usar 0,5.

*LTE\_config.scheduler\_params.alpha* - Valor de  $\alpha$  si el planificador lo requiere.

*LTE\_config.scheduler\_params.beta* - Valor de  $\beta$  si el planificador lo requiere.

*LTE\_config.power\_allocation* - Potencia de colocación, sólo *homogeneous* disponible.

### 3.3.14 Opciones del CQI

*LTE\_config.CQI\_mapper.CQI2SNR\_method* - Sirve para usar un método menos conservador a la hora de mapear el CQI frente al SNR.

### 3.3.15 Opciones del canal de subida

*LTE\_config.feedback\_channel\_delay* - Retraso del canal de subida en TTIs. Tener en cuenta que los ACKs tienen un retraso de 1 TTI.

*LTE\_config.unquantized\_CQI\_feedback* - Cuando se utiliza *true* no se redondea el valor del CQI para mapearlo frente al SINR. Por defecto se utiliza *false* convirtiendo el CQI en un valor entero.

### 3.3.16 Media de SINR

*LTE\_config.SINR\_averaging.algorithm* - Sólo se puede escoger el algoritmo MIESM para calcular la media del SINR en la v. 1.6 del simulador

- *MIESM*: Mutual Information Effective Signal to Interference and Noise Ratio Mapping

\* *LTE\_config.SINR\_averaging.BICM\_capacity\_tables* - Localización de las tablas de capacidad BICM.

\* *LTE\_config.SINR\_averaging.betas* - Valores de las  $\beta$  para la calibración.

### 3.3.17 Guardar los resultados

*LTE\_config.results\_folder* - Localización de la carpeta donde se quieren guardar los resultados de la simulación.

*LTE\_config.results\_file* - Nombre del archivo donde se almacenan los resultados. Se recomienda dejar el valor *auto*, ya que así muestra información sobre lo que contiene.

### 3.3.18 Parámetros opcionales

Existen bastantes más parámetros adicionales que se pueden configurar en el simulador. Estos se encuentran a lo largo del código. Aquí se citan algunos de los más interesantes.

*LTE\_config.additional\_penetration\_loss* - Sirve para añadir pérdidas adicionales, útil para cuando el UE se encuentra en el interior de un lugar.

- *dark cave*: 70 dB [Añadido por mi]
- *deep indoor*: 23 dB
- *indoor*: 17 dB
- *incar*: 7 dB
- *outdoor*: 0 dB

*LTE\_config.add\_femtocells* - Sirve para añadir una capa extra de femtoceldas.

*LTE\_config.sector\_azimuths* - Sirve para cambiar el número de sectores que tiene un eNodeB y cuanto ocupan cada uno. Este valor por defecto es 0:360/3:359 [0 120 240] que corresponde a tres sectores iguales de 120 grados. Por ejemplo para tener sólo dos sectores de 180 ° habría que elegir 0:360/2:359.

*LTE\_config.keep\_UEs\_still* - Sirve para mantener los UEs usando el mismo eNodeB aunque se salgan de su ROI. Por defecto se encuentra en *false*, es decir, se pueden mover libremente, cambiar a *true* para mantenerlos con el mismo eNodeB.

*LTE\_config.unquantized\_feedback* - Sirve para transmitir el rango de CQI de una manera no cuantificada, para que sea más fácil relacionar la SINR al eNodeB. Por defecto el valor es *false*.

*LTE\_config.adaptive\_RI* - Sirve para especificar un RI adaptable. Por defecto su valor es 0, emplear 2 para especificar el espectro.

## 3.4 Ejecución y gráficas

Para ejecutar el simulador hay que emplear el script disponible en la carpeta general *'LTE\_sim\_main\_launcher\_examples'*, o crear uno para tal fin. Lo más recomendable es hacer una copia del mismo, renombrarlo, ponerlo en la misma carpeta y emplear ese al ejecutar el simulador y usarlo para probar todas las diferentes configuraciones y funciones.

Todas las ordenes que se escriban en el script de ejecución prevalecerán sobre las anteriores, es decir, si por ejemplo en la función *One\_eNodeB* se ha definido el un modelo de pérdidas por trayecto macroscópicas *TS36942* tipo *urban* y luego en el script de ejecución se introduce el comando para que el modelo sea tipo rural, el modelo final mostrado será el rural.

```
simulation_type = 'One_eNodeB';
LTE_config = LTE_load_params(simulation_type);

output_results_file = LTE_sim_main(LTE_config);

simulation_data = load(output_results_file);
GUI_handles.aggregate_results_GUI = LTE_GUI_show_aggregate_results(simulation_data);
GUI_handles.positions_GUI = LTE_GUI_show_UEs_and_cells(simulation_data,GUI_handles.aggregate_results_GUI);
```

*Figura 15. Script básico de ejecución*

En la figura 15 se muestran las sentencias básicas del script de ejecución. La línea uno corresponde al tipo de simulación a cargar. *LTE\_load\_params(simulation\_type)* es la encargada de cargar este tipo de simulación en el simulador. A continuación *LTE\_sim\_main(LTE\_config)* es la función principal del sistema y se encarga de llevar a cabo la ejecución. Para ello comprueba que todos los parámetros hayan sido definidos correctamente, muestra las curvas de BLER y CQI, genera el tipo de red con todas las pérdidas y desvanecimientos, crea los UEs, los sitúa y les asigna los recursos. Finalmente, las últimas tres líneas son las encargadas de cargar los resultados obtenidos y mostrarlos en las diferentes interfaces (GUIs).

Una vez ejecutado el simulador se pueden ver los resultados en las dos interfaces que aparecen u obtener más figuras, dependiendo si se ha escogido la opción uno o dos en la sentencia *LTE\_config.show\_network*. A continuación se explican estas figuras y posteriormente las interfaces con los resultados.

### 3.4.1 Curvas BLER y asignación CQI

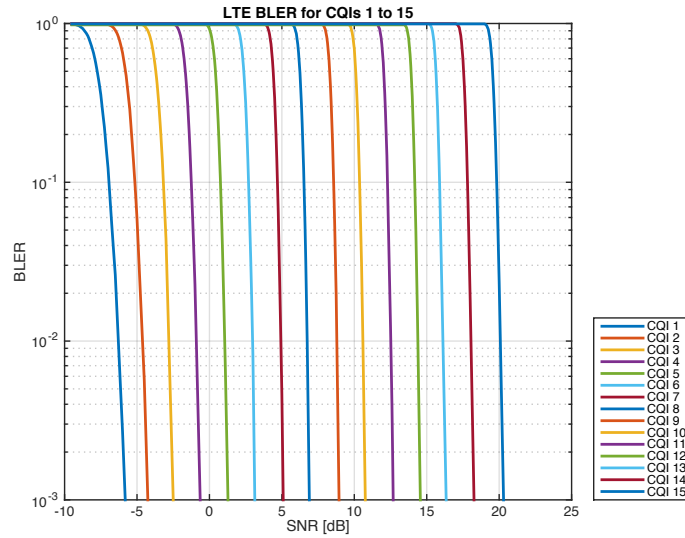


Figura 16. Relación entre la BLER, SNR y los CQIs

En la figura 16 se muestra relación existente entre el SNR y la BLER para los diferentes valores de CQI, que se muestran en forma de curvas. En la figura 17 aparecen dos sub-figuras, se trata de la misma información representada de forma diferente. En estas dos figuras se puede ver la asignación de los diferentes CQIs respecto a su SNR correspondiente, este valor proviene de normalizar al 10% la BLER para cada CQI obteniendo así la SNR correspondiente a cada CQI.

Los valores de BLER y SNR de estas figuras son fijos y son introducidos por el propio simulador mediante unas tablas. Estas figuras se emplean para identificar los CQIs. Las figuras se cargan en el simulador con la llamada a la función 'LTE\_init\_load\_BLER\_curves'.

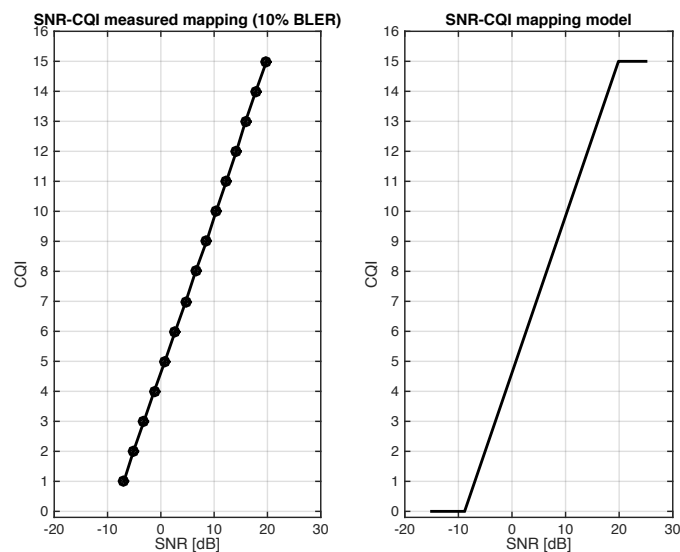


Figura 17. SNR respecto a su CQI normalizado a un 10% de BLER



### 3.4.2 Diagrama de radiación la antena

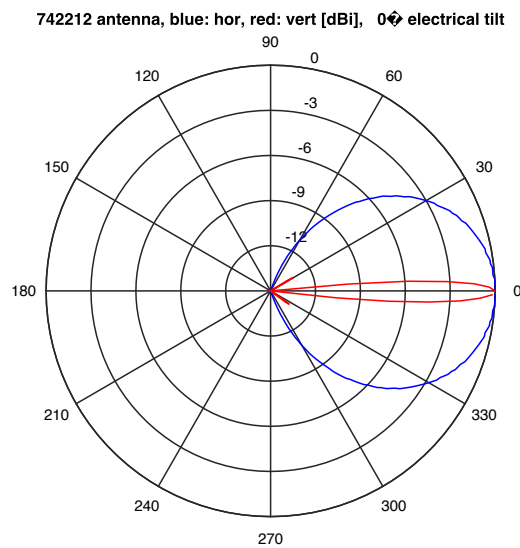


Figura 18. Diagrama de radiación de una antena Kathrein tipo 742212

La siguiente figura que muestra el simulador, es un diagrama de radiación de la antena empleada. En la figura 18 se puede ver un ejemplo de una antena Kathrein tipo 742212, empleada en la simulación correspondiente a *One\_eNodeB*. Esta figura sirve para hacerse una idea de la potencia con la que transmite la antena en el simulador. En algunas simulaciones dependiendo del tipo de antena que se seleccione Berger, TS 36.942 u otras, sólo se muestra una figura con el patrón de ganancia de la antena. También puede suceder el caso que se empleen femtoceldas y el simulador muestre dos figuras con un diagrama de radiación y otra con un patrón de ganancia.

### 3.4.3 Modelo de pérdidas macroscópicas por trayecto

La siguiente figura en aparecer representa el modelo macroscópico de pérdidas por trayecto usado por el simulador y el tipo de entorno definido. En la versión actual del simulador estos modelos pueden ser *'free space'*, *'cost 231'*, *'TS 36.942'* y *'TS 25.814'* con sus diferentes tipos de entornos urbano, rural, etc, definidos en el punto 3.3.8. En la figura 19 se puede ver un ejemplo de pérdidas por trayecto empleando un modelo TS 36.942 tipo urbano.

Las figuras mostradas siempre toman una referencia de 1800 metros y muestran las pérdidas que sufren los UEs en dBs según se van alejando. Puntualizar que si se añaden pérdidas extra mediante *'LTE\_config.additional\_penetration\_loss'*, se tienen en cuenta a la hora de mostrar la figura.

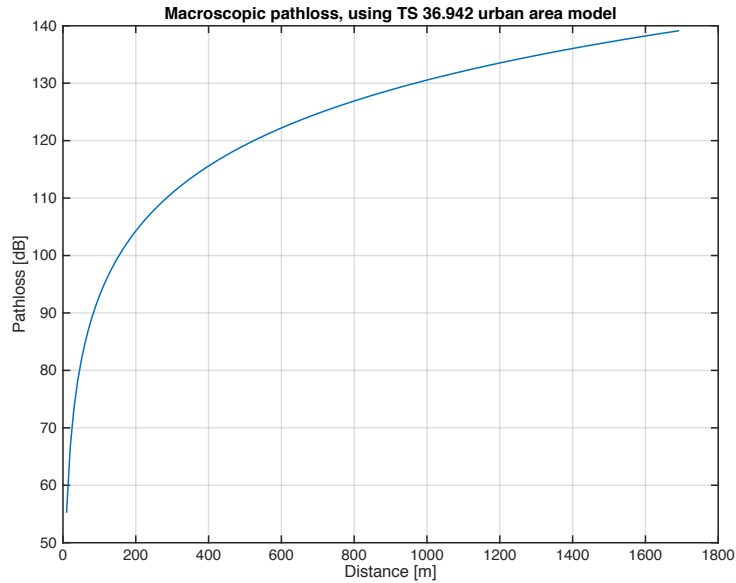


Figura 19. Modelo de pérdidas por trayecto TS 36.942 tipo urbano

También aparece otra figura u otras figuras referentes a las pérdidas por trayecto para cada sector de cada eNodeB. El número de figuras viene determinado por el número de eNodeBs, se mostrarán tantas figuras como sea necesario para mostrar todos los eNodeBs con sus respectivos sectores. En la figura 20 se puede ver un ejemplo para una simulación tipo 'One\_eNodeB' con un sólo eNodeB y tres sectores. Como es lógico se puede observar en la figura que cuanto mayores son las distancias las pérdidas también lo son, siendo el punto máximo en la parte trasera del sector.

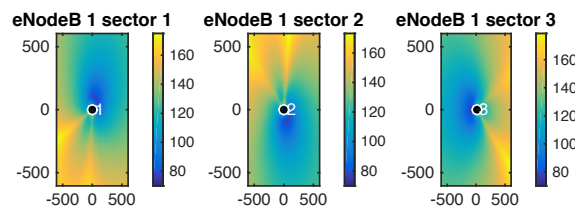


Figura 20. Pérdidas por trayecto de cada sector. Modelo TS 36.942

### 3.4.4 Desvanecimiento de gran escala

La siguiente figura corresponde al desvanecimiento de gran escala (shadow fading), aquellos producidos por la pérdida de señal debido a absorción, reflexión, dispersión y difracción. Este tipo de pérdidas son simuladas mediante una log-normal. Esta figura o figuras sólo aparecen si se ha configurado 'LTE\_config.shadow\_fading\_type' como *claussen*. Puede aparecer más de una figura ya que muestra una por cada eNodeB. En la figura 21 se muestra un ejemplo del desvanecimiento de gran escala para un sólo eNodeB correspondiente a la simulación 'One\_eNodeB'.

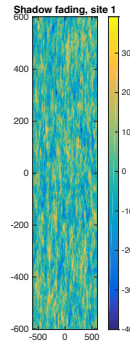


Figura 21. Generación del desvanecimiento de gran escala

### 3.4.5 SINR y CQI

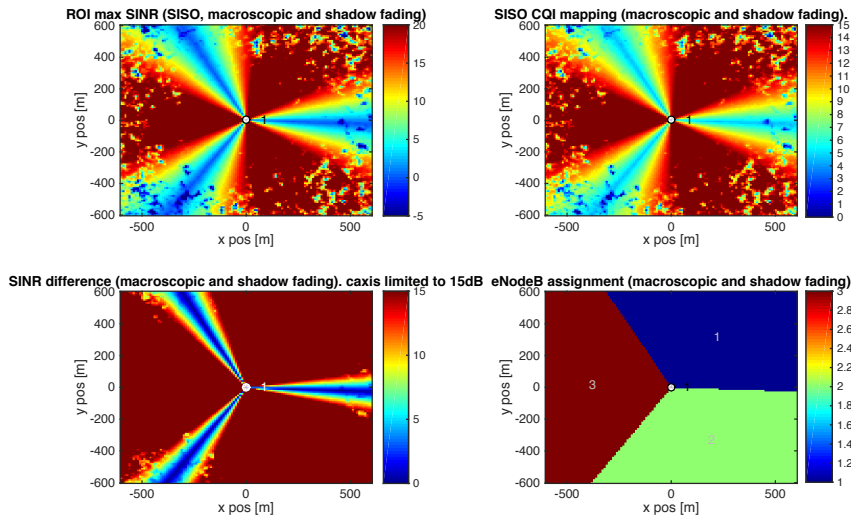


Figura 22. Asignación del SINR. Mapeo del CQI. Diferencia de SINR. Asignación de sectores de los eNodeBs. Con desvanecimiento de gran escala.

Posteriormente el simulador muestra otras dos figuras que se dividen a su vez en cuatro sub-figuras mostrando un total de 8 sub-figuras. En la primera de las sub-figuras se muestra el SINR generado, este se calcula mediante un método matemático llamado MIESM. En la segunda de las sub-figuras se muestra los diferentes CQIs para cada sector. Las otras dos sub-figuras son la diferencia de SINR por sector y un mapa de sectores.

Las dos figuras muestran lo mismo, la única diferencia es que la primera incluye desvanecimiento de gran escala y la segunda no. En caso de que se haya elegido no emplear desvanecimiento de gran escala, el simulador mostrará las dos figuras repetidas.

En las figuras 22 y 23 se puede ver un ejemplo de estas dos figuras con sus respectivas sub-figuras. En concreto corresponden a la simulación 'One\_eNodeB' con un

### CAPÍTULO 3: SIMULADOR LTE

sólo eNodeB. Si se emplea un tipo de simulación con más eNodeBs, no aparecerán más figuras como en casos anteriores, sino que se mostrarán todos los eNodeBs con sus respectivos sectores dentro de cada sub-figura, dificultando a veces su lectura.

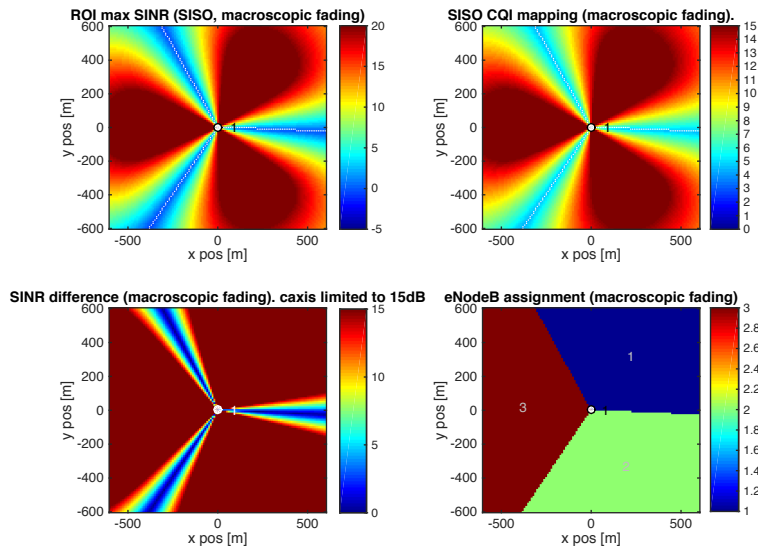


Figura 23. Asignación del SINR. Mapeo del CQI. Diferencia de SINR. Asignación de sectores de los eNodeBs. Sin desvanecimiento de gran escala.

Finalmente, el simulador muestra una última figura también relacionada con la SNIR. En ella se puede ver la SNIR en la región de interés (ROI), representada mediante una función de distribución acumulativa. La línea continua representa la SNIR incluyendo el desvanecimiento de gran escala y la línea discontinua representa la SNIR sin desvanecimiento de gran escala.

En la figura 24 se puede ver un ejemplo de esta última figura.

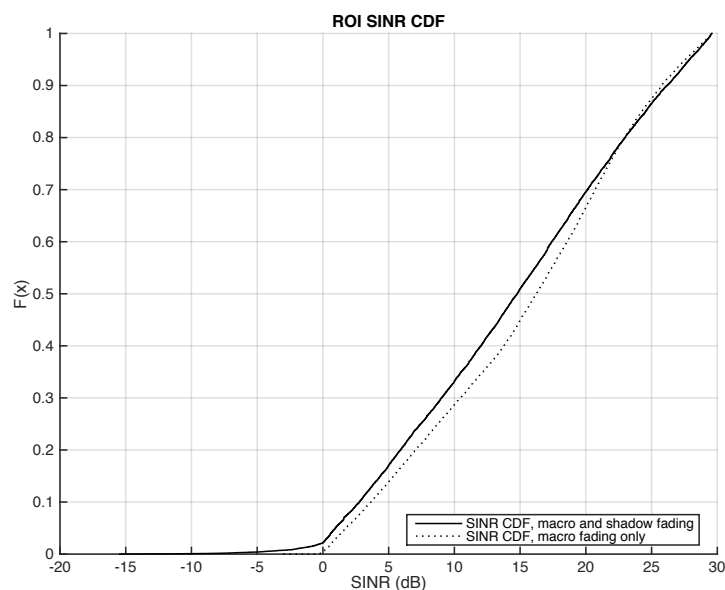


Figura 24. SINR en la región de interés

### 3.4.6 Interfaz 1. Resultados obtenidos de eficiencias y SINR

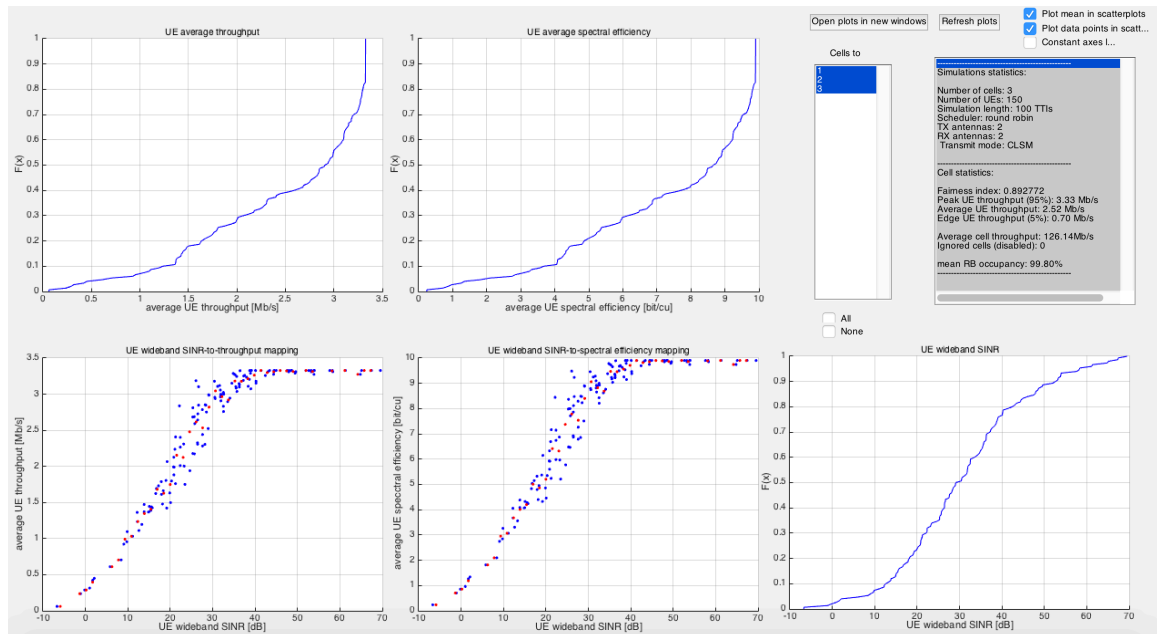


Figura 25. Interfaz 1. Resultados obtenidos de eficiencias y SINR para 150 UEs

Es el primer conjunto de resultados en mostrarse tras ejecutar el simulador. Siempre se muestra tras la ejecución del simulador independientemente de la opción escogida a la hora de mostrar figuras. La función encargada de crear esta interfaz y mostrar los resultados es `'LTE_GUI_show_aggregate_results'`. La interfaz muestra 5 figuras, de arriba abajo y de izquierda a derecha estas muestran:

- Eficiencia media (mbit/s) de los UEs mediante una función ECDF.
- Eficiencia espectral media (bit/cu) de los UEs mediante una función ECDF.
- SINR (dB) de los diferentes UEs respecto su eficiencia media (mbit/s)
- SINR (dB) de los diferentes UEs respecto su eficiencia espectral media (bit/cu)
- SINR (dB) de los diferentes UEs mediante una función ECDF

Además, esta interfaz muestra una tabla con la configuración básica empleada y los resultados obtenidos, que son el índice de justicia, eficiencia pico (95%) de los UEs, eficiencia media de los UEs, eficiencia límite (5%) de los UEs, eficiencia media del eNodeB, número de celdas de los eNodeBs ignoradas y la ocupación media de los RBs.

Todos estos resultados corresponderán a un sólo sector de un eNodeB o varios sectores de uno o varios eNodeBs según se hayan seleccionado. Para ello hay una pestaña llamada `'cell to'` con tal fin.

Finalmente, de las opciones restantes, la más interesante es la de abrir cada una de estas figuras en diferentes ventanas y así poder emplear las `'utilidades'` de MATLAB. Se muestra un ejemplo de los resultados para un sólo eNodeB y 150 UEs en la figura 25.

### 3.4.7 Interfaz 2. Posición de los UEs y eNodeBs

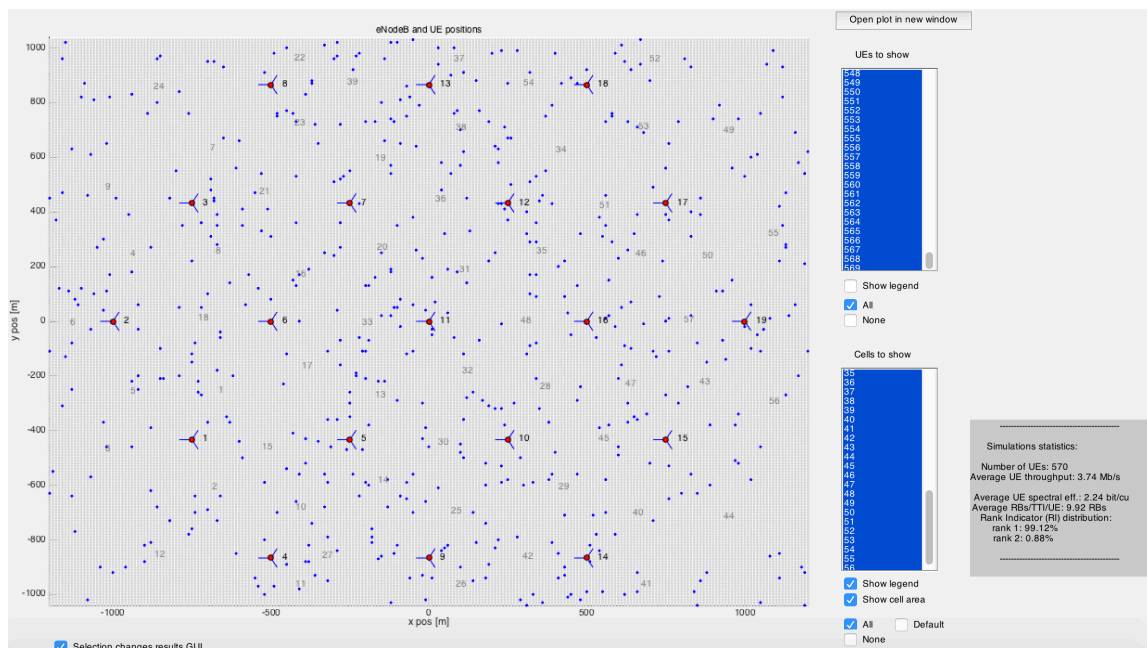


Figura 26. Interfaz 2. Mapa con las posiciones de los UEs y eNodeBs

La segunda interfaz que muestra el simulador corresponde a un mapa con las posiciones de los diferentes UEs y eNodeBs. Esta interfaz también se muestra al realizar cualquier simulación, independientemente del número de figuras elegidas con `LTE_config.show_network`.

La interfaz sólo tiene una figura dentro que muestra a los eNodeBs con una triple aspa y a los UEs mediante puntos. En el lateral hay dos cuadros de selección que permiten seleccionar el número de eNodeBs y UEs a resaltar. El cuadro llamado 'Cells to show' permite elegir que sectores de los eNodeBs se quieren seleccionar y el cuadro 'UEs to show' permite elegir que UEs se quieren seleccionar.

También se puede ver en la interfaz resultados sobre la simulación. El número de UEs seleccionados, la eficiencia media de dichos UEs, la eficiencia espectral media de los UEs, la media de RBs ocupados y el indicador RI de la distribución.

Igual que en la interfaz 1, ésta también permite abrir la figura con las posiciones en una nueva ventana, para así poder emplearla con las 'utilidades' de MATLAB.

En la figura 26 se puede ver un ejemplo del mapa de posiciones de los UEs y de los eNodeBs para una simulación tipo 'tri\_sector' con 10 UEs por sector.

# Capítulo 4

## Simulaciones

### 4.1 Simulaciones realizadas

En este capítulo se realizan simulaciones para cuatro escenarios diferentes. La intención es tratar el mayor número de casos posibles, por lo tanto estos escenarios se dividen de la siguiente manera. Tres de los escenarios son estudiados mediante el simulador y un cuarto escenario sirve para reflejar la realidad.

En el escenario 1, se busca estudiar que sucede cuando sólo un eNodeB esta disponible y sólo opera un UE por sector. Se centra en estudiar temas como las pérdidas por trayecto, CQI, BLER y como afectan los diferentes sistemas MIMO, entre otros.

En el escenario 2, se intenta reflejar la situación de un eNodeB cuando opera más de un UE por sector, en concreto en este proyecto se estudian ejemplos con 2, 10 y 50 UEs por sector. Se vuelven a repetir pruebas realizadas en el escenario 1 para poder comparar los resultados y además se introducen otras más, como el uso de planificadores, desvanecimiento de pequeña escala, etc.

En el escenario 3, el objetivo es mostrar lo que sucede con un conjunto de eNodeBs y UEs. Para ello se emplean los ficheros de simulación proporcionados por el simulador, que ofrecen diferentes combinaciones de colocación de los eNodeBs. Luego se introducen pequeños cambios y se vuelven a realizar pruebas semejantes al escenario 1 y 2 para poder comparar los resultados. Además, se estudian otras nuevas como separaciones de celdas.

En el escenario 4, la finalidad es realizar pequeñas comparaciones del mundo real con el simulador. Para ello se usa un conjunto de herramientas y se realizan unas suposiciones datos estadísticos para poder comparar los resultados con los del simulador.

## 4.2 Escenario 1

CONFIGURACIÓN	
eNodeB	1
UE/sector	1
UEs	3
Frecuencia	2600 Mhz
Ancho de banda	20 Mhz
TTI	100

En este primer escenario se estudia lo que sucede cuando se emplea el simulador con un sólo eNodeB, el cual tiene tres sectores. Para tal fin se ha modificado un fichero de otra simulación para generar la nueva simulación deseada y así poder operar de una manera más cómoda a la hora de analizar los resultados. El fichero que contiene la nueva configuración de simulación se denomina *One\_eNodeB*. Los elementos de la configuración que se mantienen constantes durante todo el escenario se encuentran arriba.

### 4.2.1 Modos de transmisión

Lo primero que se estudia es lo que ocurre al emplear los diferentes modos de transmisión. Para ello se ha escogido un planificador común, en este caso *Round Robin*, pérdidas para un modelo TS36942 en entorno urbano, desvanecimiento de pequeña escala tipo *PedB* y UEs desplazándose a una velocidad de 7 km/h.

Los modos de transmisión empleados son los disponibles en el simulador a nivel de sistema empleado para este proyecto v. 1.6, es decir, del 1 al 4. Éstos son SISO, TxD, OLSM y CLSM. Las configuraciones de antenas empleadas son 1x1 para SISO y 2x2 para el resto de modos de transmisión.

Modos de transmisión				
Modo de transmisión	Eficiencia pico del UE (95%)(Mb/s)	Eficiencia media del UE (Mb/s)	Eficiencia límite del UE (5%)(Mb/s)	Eficiencia media de celda (Mb/s)
SISO	88,69	77,71	68,31	77,71
TxD	84,25	80,53	73,09	80,53
OLSM	168,50	161,66	156,51	161,66
CLSM	168,50	164,48	156,42	164,48

Tabla 5. Comparación de la eficiencia según el modo de transmisión



## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 5, donde lo primero que se observa es que la eficiencia media de cada celda es igual al valor de la eficiencia media en cada UE, esto se debe a que sólo hay un UE por celda. Lo siguiente que se aprecia que los valores de eficiencias medias por celda son parecidos entre los modos de transmisión SISO y TxD, mejorando sensiblemente en TxD al contar con dos antenas y que aumenta considerablemente para los modos MIMO con multiplexación, modos OLSM y CLSM. En la figura 26 se puede ver un ejemplo de este escenario usando el modo OLSM.

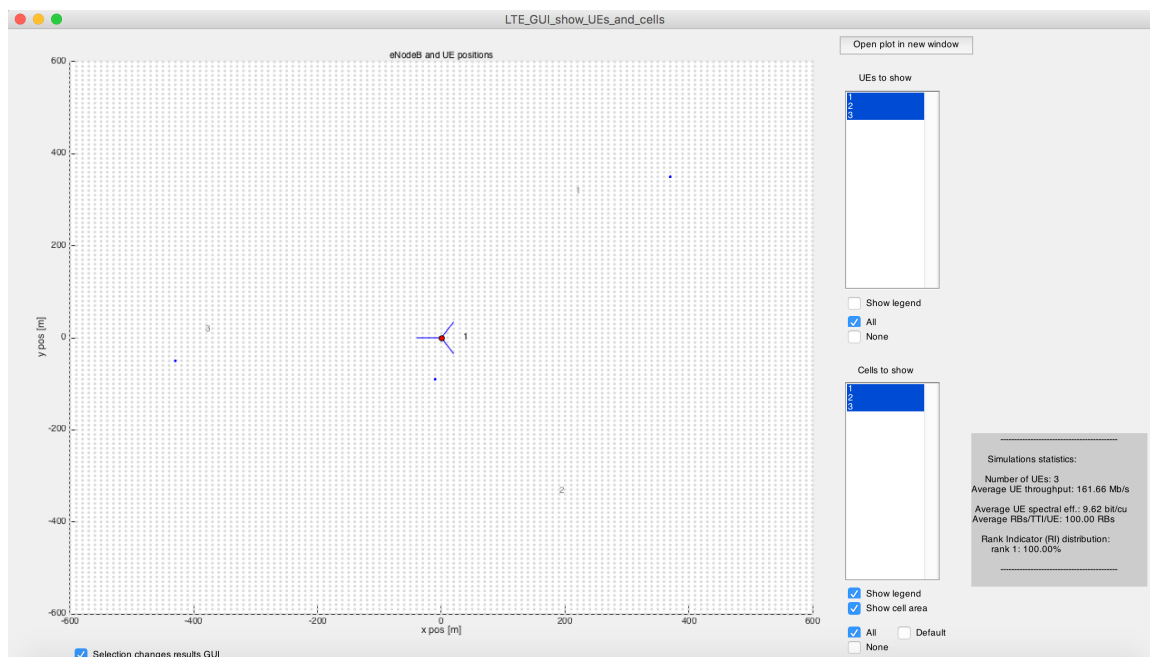


Figura 27. Mapa de cobertura con un eNodeB y 3 UEs

### 4.2.2 Pérdidas por trayecto debido al entorno

A continuación se analiza como fluctúa la eficiencia debido a las pérdidas, variando el tipo de entorno así como su penetración. Para ello se utiliza el modo de transmisión CLSM con una configuración de 2x2, un planificador tipo *Round Robin*, desvanecimiento de pequeña escala tipo *PedB* y la velocidad de desplazamiento de los UEs a 5 km/h.

Las pruebas realizadas son para un modelo de pérdidas tipo COST231 simulando un entorno urbano con macroceldas y un entorno suburbano con macroceldas. Además para el tipo de pérdidas de entorno urbano con macroceldas se añaden dos casos extras cuando el UE se encuentra el interior de un lugar, p. ej. un edificio y cuando el UE se encuentra en un interior más profundo, p. ej. un garaje. Todas estas pruebas se realizan para tres casos diferentes, cuando el UE se encuentra en una posición cercana al eNodeB, cuando se encuentra a una distancia media y cuando se encuentra en una posición lejana. También cabe mencionar que todas estas pruebas se repiten 5 veces para cada caso siendo el valor final mostrado en la tabla 6 una media.

COST231				
Distancia del UE al eNodeB	Urbano Macro	Suburbano Macro	Urbano Macro + interior	Urbano Macro + interior profundo
Cerca	155,535	144,223	41,243	40,340
Media	87,804	94,166	22,630	9,763
Lejos	32,500	23,650	3,363	0

Tabla 6. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas generadas en diferentes entornos urbanos y suburbanos

Analizando los resultados de la tabla anterior se observa que según se alejan los UEs, se producen unas pérdidas alrededor del 50%, para todos los casos excepto *Urbano Macro + interior profundo* que son del 75%, al pasar de posición cercana a media. Y unas pérdidas de alrededor del 60% para *Urbano Macro* y *Suburbano Macro* al pasar de posición media a lejana, acentuándose éstas si añadimos un extra de pérdidas *interior* o *interior profundo*, llegando a ser del 90% y 100%, respectivamente. En la figura 28 se puede ver a modo de ejemplo como afectan las pérdidas por distancia al modelo empleado *cost231 urbano macro*.

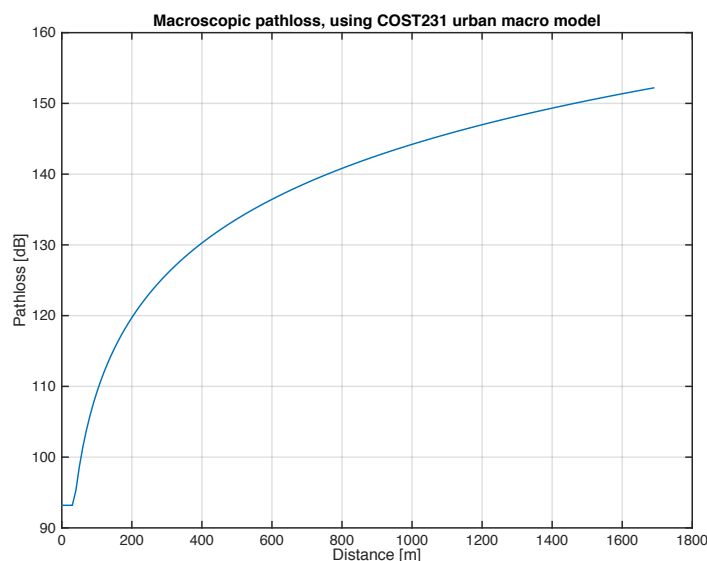


Figura 28. Pérdidas por trayecto para modelo macroscópico COST231 urban macro

La siguiente prueba que se realiza es para un modelo macroscópico de pérdidas por trayecto *TS36942*, para ver lo que ocurre cuando cambiamos de un entorno urbano a uno rural. También se ha incluido un caso llamado *rural + cueva profunda*, que introduce unas pérdidas extras para simular que pasaría si el UE se encuentra en un lugar más oculto como puede ser una cueva. El resto de parámetros empleados son los mismos que en el caso anterior.

TS36942			
Distancia del UE al eNodeB	Urbano	Rural	Rural + cueva profunda
Cerca	168,50	168,50	13,05
Media	132,11	168,43	8,44
Lejos	68,70	167,75	0

Tabla 7. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas producidas en entornos rurales vs urbanos

Como se muestra en la tabla 7, ahora las pérdidas afectan de forma menor en el caso urbano que en la tabla anterior, esto se debe a que se ha variado el modelo de pérdidas por trayecto. Ahora las pérdidas en el caso urbano son alrededor de un 20% al variar la distancia de cerca a media y un 50% al variarla de media a lejana. En el entorno rural las pérdidas son inapreciables ya que es un espacio más abierto y las distancias no son grandes. Sin embargo donde si afectan las pérdidas considerablemente al UE, es cuando se encuentra en un lugar aislado como una cueva.

### 4.2.3 Eficiencia espectral y CQI

La siguiente prueba realizada sirve para ver el tipo de modulación empleada por un UE y a que CQI corresponde. Para ello se vuelve a emplear la configuración inicial de este caso con el modelo de pérdidas TS36942 tipo urbano. Por otra parte también se mide la eficiencia espectral media para los diferentes UEs. Ésta se cuantifica en *bit/cu*, lo cual significa bits por unidad de caudal, o lo que es equivalente *bit/simbolo*.

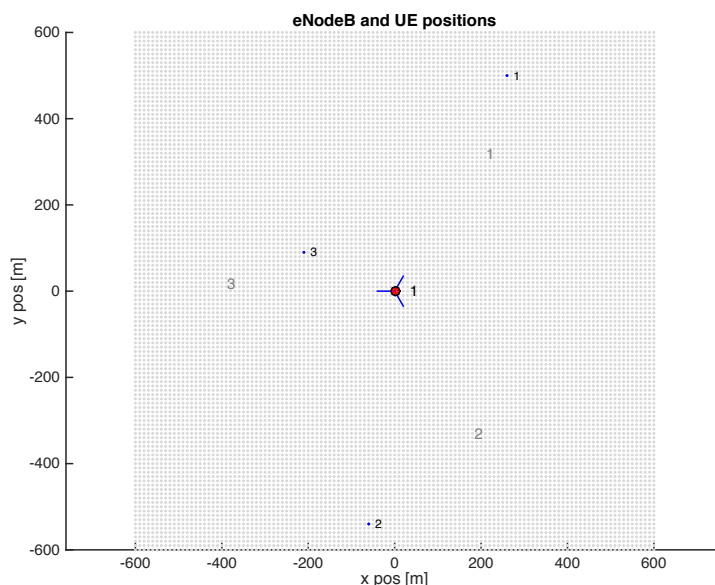


Figura 29. Mapa de situación de los UEs

CQI					
UE	Posición UE (x,y)(m)	Distancia UE a eNodeB (m)	Eficiencia media (Mb/s)	Eficiencia espectral media (bit/cu)	CQI
1	(260,500)	563,56	129,50	7,71	15
2	(-60,-540)	543,32	17,49	1,04	4,83
3	(-210,90)	228,47	168,50	10,03	15

Tabla 8. Eficiencia, eficiencia espectral, SINR y CQI de 3 UEs

En la figura 29 se muestran los 3 UEs medidos en esta prueba, éstos se representan mediante puntos azules y números. Para buscar el valor del CQI, se ha medido la posición exacta donde se encuentran los UEs con el cursor que proporciona MATLAB y posteriormente se ha buscado dicha posición en el mapa de CQIs que proporciona el simulador. Dicho mapa se puede ver en la figura 22 de este proyecto, en concreto la sub-figura que se titula ‘*SISO CQI mapping (macroscopic and shadow fading)*’.

En la tabla 8 se pueden ver los valores de CQI para los tres UEs junto con el resto de resultados obtenidos. Si se observa atentamente la tabla 8 y la figura 29 se puede ver como los UEs 1 y 2 se encuentran aproximadamente a la misma distancia, pero su eficiencia y eficiencia espectral varían considerablemente. Aunque las pérdidas por trayecto son similares y el canal empleado el mismo, el tipo de modulación varía y además varía la señal debido al desvanecimiento de gran escala, éstas son las dos causas que producen las diferencias de eficiencia, eficiencia espectral y CQI. También se ve con los UEs 1 y 3 como al variar la distancia y por tanto las pérdidas por trayecto, aunque tengan el mismo CQI, su eficiencia varía.

La modulación empleada por cada UE según la tabla 4 corresponde a 64-QAM para los UEs 1 y 3 y QPSK para el UE 2. Con lo cual se certifica que cuanto mayor sea la modulación y estando en las mismas condiciones, se obtiene mejor eficiencia.

#### 4.2.4 BLER

La última prueba de este escenario se refiere a los diferentes tipos de ruido. Para realizar esta prueba se han empleado los mismos parámetros que en el caso 4.2.3, con la diferencia que ahora se modifica el tipo de desvanecimiento de gran escala y se fijan los UEs en una posición concreta. Se vuelve a calcular los valores de CQI de la misma manera que se habían calculado anteriormente, en el caso sin desvanecimiento de gran escala se usa la figura 23 en vez de la 22 para calcularlos. Para calcular la SNR se emplean los CQIs obtenidos y se mira en las curvas de BLER (figuras 16 y 17) el valor de SNR para cada CQI a un 10%.

Ruido					
UE	Eficiencia (Mb/s)	Eficiencia espectral media (bit/cu)	SNIR (dB)	CQI	SNR (dB)
<b>Con desvanecimiento de gran escala</b>					
1	144,91	8,63	26,76	7,294	4,694
2	162,04	9,65	31,15	15	19,83
3	47,64	2,84	8,116	6,972	4,694
<b>Sin desvanecimiento de gran escala</b>					
1	72,89	4,34	14,72	7,113	4,694
2	159,09	9,47	30,08	15	19,83
3	66,46	3,97	12,75	8,663	8,57

Tabla 9. Diferentes medidas incluyendo ruidos con y sin desvanecimiento de gran escala

En la tabla 9 se pueden ver los resultados de los 3 UEs posicionados según la figura 31, cuando hay y cuando no hay desvanecimiento de gran escala. En ella se puede ver que aun teniendo el mismo CQI y la misma SNR, a medida que aumenta la eficiencia también aumenta la SNIR, ya que la potencia transmitida es mayor, por ejemplo en el UE1 en ambos casos y el UE3 con desvanecimiento de gran escala. También muestra otros casos como el UE 2 con y sin desvanecimiento de gran escala, que tienen el mismo CQI y la misma SNR, aunque la eficiencia es ligeramente mayor en el caso con desvanecimiento de gran escala dado que su eficiencia espectral y SNIR son mayores.

Hay que aclarar que aunque algunos UEs tengan el mismo CQI y obtengan eficiencias diferentes estando en la mismas posiciones, se debe a que la potencia transmitida puede ser mayor en ese instante.

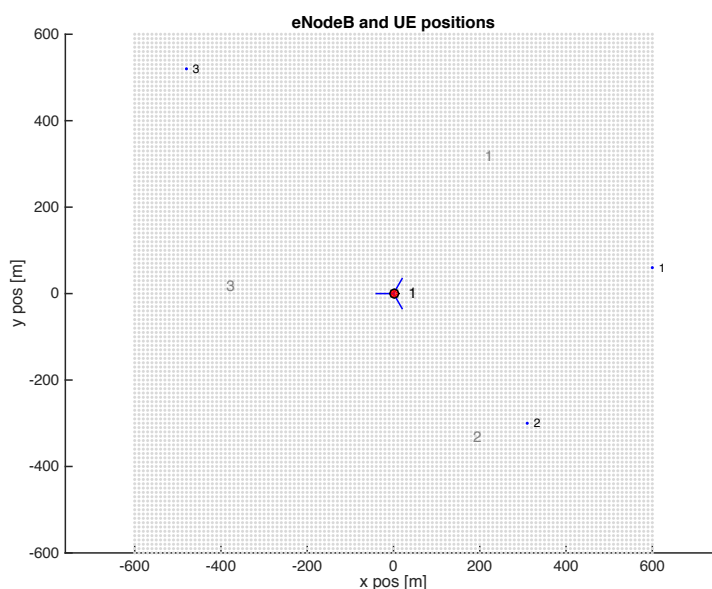


Figura 30. Posiciones de los UEs

## 4.3 Escenario 2

CONFIGURACIÓN	
eNodeB	1
UE/sector	2/10/50
UEs	6/30/150
Frecuencia	2600 Mhz
Ancho de banda	20 Mhz
TTI	100

El escenario dos se centra en el estudio de un sólo eNodeB y múltiples UEs. Se repiten varias de las pruebas del caso uno para ver las variaciones que se producen con la inclusión de nuevos UEs. También se añaden nuevas pruebas como la comparación de planificadores. Para este caso se emplea el fichero con la configuración de simulación *One\_eNodeB* pero añadiendo múltiples UEs.

Las posibles combinaciones de UEs son 2, 10 y 50 UEs por celda sumando un total de 6, 30 y 150 UEs en el mismo eNodeB.

### 4.3.1 Modos de transmisión

La configuración utilizada para analizar los diferentes modos de transmisión es planificador tipo *Round Robin*, pérdidas por trayecto con modelo TS36942 en entorno urbano, desvanecimiento de pequeña escala tipo *PedB* y UEs desplazándose a una velocidad de 7 km/h.

Los modos de transmisión empleados junto con sus posibles configuraciones son las mismas del escenario 1, SISO (1x1), TxD (2x2), OLSM (2x2) y CLSM (2x2). Sin embargo esta vez se fija la posición de los UEs en un punto concreto mediante la función *LTE\_config.RandStreamSeed* a  $10^7$ , para obtener una comparación más fidedigna.

En la tabla 10 se pueden observar los resultados obtenidos. Igual que en el escenario 1, estudiado anteriormente para un sólo UE por celda, los resultados son acordes. Cuando se emplea el modo de transmisión SISO, se obtiene la menor de las eficiencias, siendo esta prácticamente inexistente cuando hay 150 UEs y éstos se encuentren alejados. Al emplear el modo de transmisión TxD se mejora la eficiencia en la celda y también la eficiencia media, pero cuando los UEs se encuentran cerca del eNodeB es un poco menor que para SISO, no siendo así cuando el están alejados que si supera a SISO. Finalmente, para los modos de transmisión con multiplexación se obtienen las mayores eficiencias para todos los casos, fijarse que a mayor número de UEs CLSM si destaca frente a OLSM y obtiene mayor eficiencia tanto en distancias cortas como en distancias largas.

<b>Modos de transmisión</b>				
<b>Modo de transmisión</b>	<b>Eficiencia pico del UE (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media del UE (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia límite del UE (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media de celda (Mb/s)</b>
<b>6 UEs</b>				
SISO	44,98	40,98	30,65	81,96
TxD	42,11	42,02	41,53	84,03
OLSM	84,23	73,35	44,14	146,70
CLSM	84,23	75,20	54,15	150,40
<b>30 UEs</b>				
SISO	8,86	6,94	2,11	69,41
TxD	8,42	7,49	3,88	74,90
OLSM	16,83	12,11	3,80	121,07
CLSM	16,83	12,50	4,46	125,02
<b>150 UEs</b>				
SISO	1,75	1,29	0,25	64,32
TxD	1,66	1,47	0,40	73,26
OLSM	3,33	2,24	0,39	111,92
CLSM	16,83	12,50	4,46	125,02

Tabla 10. Eficiencia de varios UEs empleando diferentes modos de transmisión

### 4.3.2 Pérdidas por trayecto debido al entorno

A continuación se analizan las pérdidas empleando el modelo macroscópico COST231 para diferentes tipos de entornos. Se realizan pruebas en entornos urbanos con y sin pérdidas extras. El número de UEs vuelve a ser 2, 10 y 150 por celda. Se emplea un modo de transmisión CLSM (2x2), desvanecimiento de pequeña escala tipo *PedB*, un planificador tipo *Round Robin* y una velocidad de desplazamiento de los UEs de 5 km/h, semejante al escenario 1 para poder comparar con dicho escenario.

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

<b>COST231</b>				
<b>Distancia del UE al eNodeB</b>	<b>Urbano Macro</b>	<b>Suburbano Macro</b>	<b>Urbano Macro + interior</b>	<b>Urbano Macro + interior profundo</b>
<b>6 UEs</b>				
Cerca	84,23	84,23	32,83	19,45
Lejos	17,67	3,71	0	0
<b>30 UEs</b>				
Cerca	16,74	16,00	15,28	14,45
Lejos	0,15	0,03	0	0
<b>150 UEs</b>				
Cerca	3,24	3,31	2,02	1,91
Lejos	0,05	0,08	0	0

Tabla 11. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas generadas en diferentes entornos urbanos y suburbanos para diferentes números de UEs

Los resultados obtenidos en la tabla 11 muestran la tendencia que se producía en el escenario 1 cuando sólo se medía la eficiencia debido a las pérdidas para un sólo UE, que cuanto mayores son las pérdidas menor es la eficiencia. Además confirma algo presumible, que a mayor número de UEs también se reduce la eficiencia de cada uno. También se puede observar que para los casos en los cuales los UEs se encuentran posiciones lejanas en interiores la eficiencia es inexistente y salvo para los casos de 2 y 10 UEs por celda, aunque no haya pérdidas extras de interiores, la velocidad en los casos lejanos es ínfima. Como prueba extra a las mostradas en la tabla anterior, se ha probado a utilizar un modo de transmisión CLSM en configuración 4x4 para el caso *Urbano Macro + interior profundo* con 150 UEs totales y la mejora en la eficiencia ha sido de 2,92 Mb/s para los UEs cercanos y 0 Mb/s para los UEs lejanos.

A continuación se repiten las pruebas para un modelo macroscópico de pérdidas por trayecto *TS36942* en un entorno urbano frente a uno rural, esta vez incrementando el número de UEs. Incluye el caso extra *rural + cueva profunda*. El resto de parámetros se mantienen constantes como en ocasiones anteriores.

En la tabla 12 se pueden ver los resultados de dicha prueba. Se ve como se reparte la eficiencia aproximada de 160 Mb/s por celda, entre los diferentes usuarios. En el entorno urbano al alejarse más los UEs afectan las pérdidas más, con lo cual la eficiencia disminuye, se pierde entre un 60/80 % según se aumenta el número de UEs. En cambio para entornos rurales las pérdidas son menores, ya que apenas hay obstáculos y las distancias no son grandes, sólo afectan las pérdidas cuando se le añaden pérdidas extra tipo *cueva profunda*, como se puede ver en la tabla.



TS36942			
Distancia del UE al eNodeB	Urbano	Rural	Rural + cueva profunda
<b>6 UEs</b>			
Cerca	84,23	84,23	20,00
Lejos	36,28	83,11	0
<b>30 UEs</b>			
Cerca	16,83	16,83	3,72
Lejos	3,81	16,13	0
<b>150 UEs</b>			
Cerca	3,33	3,33	0,65
Lejos	0,63	3,04	0

Tabla 12. Eficiencias (Mb/s) según las pérdidas producidas en entornos rurales vs urbanos para diferentes números de UEs

### 4.3.3 Pérdidas debidas al canal de transmisión

La siguiente prueba no realizada en el escenario 1 sirve para comprobar como afecta la velocidad de desplazamiento a un UE. Para ello esta vez se escoge una configuración CLSM 2x2, modelo macroscópico TS36942 en entorno urbano, desvanecimiento de pequeña escala tipo PedB, planificador Round Robin y 10 UEs por celda o lo que lo mismo un total de 30 UEs totales en el eNodeB. Se establecen diferentes velocidades para los UEs, 0 km/h en caso de que se encuentre en reposo, 5 km/h en caso de que caminen, 7 km/h en caso de caminar de forma ligera, 12 km/h si corren a trote y 20 km/h si corren rápidamente.

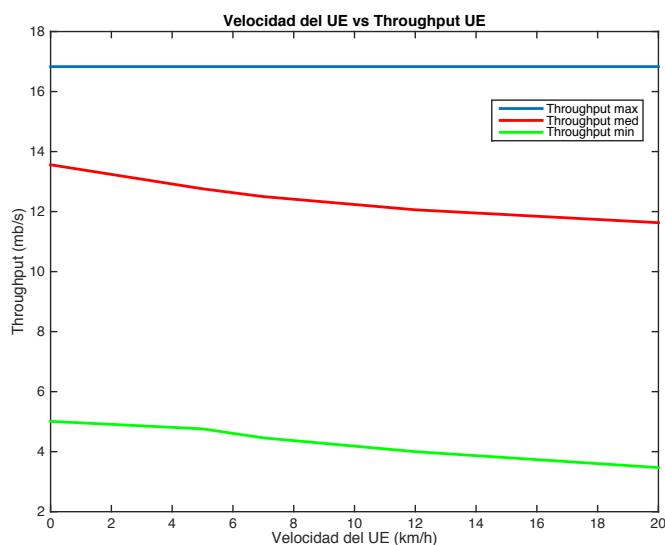


Figura 31. Velocidad desplazamiento de los UEs frente a su eficiencia

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

En la figura 31 se pueden ver los resultados obtenidos. La línea azul corresponde a la eficiencia máxima de los UEs o *eficiencia pico del UE (95%)*, como se puede ver este valor no varía de los 16.83 Mb/s independientemente de la velocidad que se desplacen los UEs, ya que la distancia de los mismos es cercana al eNodeB. La línea roja corresponde a la eficiencia media o *eficiencia media del UE*, este valor medio de eficiencia desciende y pasa a ser de 13,56 Mb/s a 11,63 Mb/s desde los UEs estáticos hasta los que se desplazan a 20 km/h, respectivamente. Finalmente, la línea verde corresponde a la eficiencia mínima o *eficiencia límite del UE (5%)*, ésta es la eficiencia de los UEs más alejados, el cual sí disminuye a medida que se aumenta la velocidad de desplazamiento de los UEs, pasando de 5,01 Mb/s para los UEs estáticos a 3,47 Mb/s de los que se desplazan a 20 km/h.

Otra prueba interesante es ver que sucede cuando los UEs se desplazan a velocidades mayores, siendo éstas dentro de vehículos. Para ello se establecen las siguientes velocidades de desplazamiento, un automóvil parado 0 km/h, un ciclomotor a 50 km/h, un automóvil por autopista a 120 km/h, un tren a 170 km/h, un tren de alta velocidad como el AVE a 330 km/h, un maglev como el de Shanghai a 430 km/h y un supuesto futuro Hyperloop a 1130 km/h, recordar que en teoría un eNodeB en LTE soporta sólo 500 km/h. La configuración escogida es CLSM 2x2, modelo macroscópico *TS36942* en entorno urbano, desvanecimiento de pequeña escala para un canal tipo VehB, planificador *Round Robin* y 10 UEs por celda o 30 UEs por eNodeB.

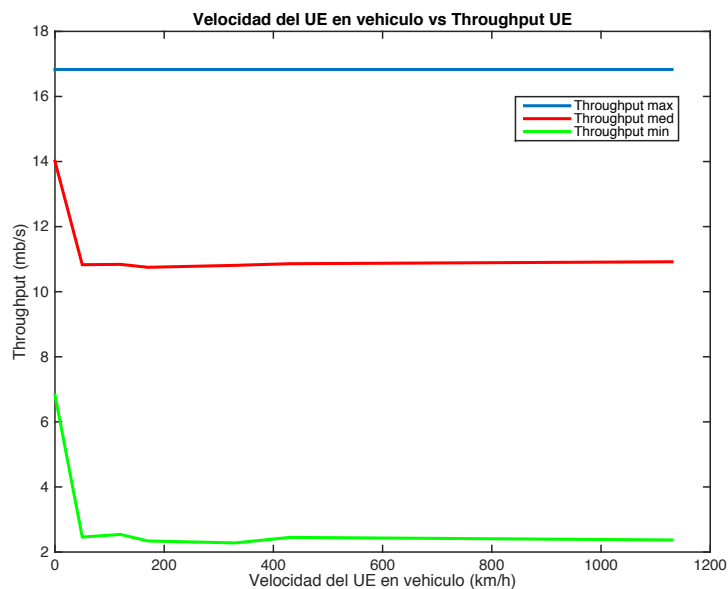


Figura 32. Velocidad desplazamiento de los UEs en vehículos frente a su eficiencia

En la figura 32 se pueden ver los resultados obtenidos. Otra vez la línea azul corresponde a la eficiencia máxima de los UEs o *eficiencia pico del UE (95%)* y este valor se vuelve a mantener a 16.83 Mb/s, independientemente de la velocidad que se desplacen los UEs. La línea roja vuelve a corresponder a la eficiencia media o *eficiencia media del UE* y se observa que excepto cuando el vehículo se encuentra parado, que es

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

un poco mayor 14,01 Mb/s, para el resto de los casos ronda los 10 Mb/s . Por último la línea verde corresponde a la eficiencia mínima o *eficiencia pico del UE (5%)*, ésta es la eficiencia de los UEs más alejados y su valor es de 6.83 Mb/s cuando el vehículo está en reposo y alrededor de 2,5 Mb/s cuando el vehículo está en movimiento, independientemente de la velocidad. De todas formas, mencionar que estas medidas están hechas para la configuración anteriormente descrita y a unas distancias muy próximas al eNodeB. En un caso real, la eficiencia si se vería mermada a velocidades altas debido a la distancia y en especial para aquellos UEs que tuvieran CQI altos. Aparte que se puede comprobar que el simulador no tiene en cuenta la velocidad máxima introducida.

### 4.3.4 Planificadores

Otro punto a tener en cuenta son los planificadores, sobre todo para los UEs en posiciones lejanas, por ello se ha decidido medir la eficiencia al usar los diferentes planificadores que ofrece el simulador. La configuración empleada ha sido CLSM 2x2, modelo de canal tipo PedB, pérdidas macroscópicas en entorno urbano y UEs desplazándose a 5 km/h.

Planificadores								
Eficiencia (Mb/s)	Round Robin	Prop Fair Sun	Best CQI	Resource Fair	Max Min	Max TP	Constrained ( $\alpha = 0.5$ )	Alpha Fair ( $\alpha = 0.5$ )
<b>6 UEs</b>								
Máxima	84,23	86,28	159,86	84,25	84,52	158,08	165,04	90,55
Media	75,41	78,51	83,67	77,89	77,65	82,91	77,71	78,77
Mínima	53,32	62,40	5,46	59,57	61,86	6,03	0,17	55,47
<b>30 UEs</b>								
Máxima	16,83	16,39	47,00	16,81	17,02	36,38	164,09	16,38
Media	12,76	12,72	16,7	13,55	12,51	16,39	16,48	13,40
Mínima	4,66	7,34	0	5,77	5,59	0	0	6,74
<b>150 UEs</b>								
Máxima	3,33	3,03	8,25	3,32	3,34	9,52	0,70	3,02
Media	2,39	2,11	3,27	2,50	2,08	3,15	3,32	2,37
Mínima	0,82	0,86	0	0,87	0,79	0	0	0,57

Tabla 13. Eficiencia obtenida por los UEs para diferentes planificadores

Los resultados de las eficiencias obtenidas son mostrados en la tabla 13. Mencionar que uno de los planificadores FFR no funciona con desvanecimiento de gran escala, así

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

que se ha omitido en esta prueba para que todos los casos empleen la misma configuración.

Como se puede ver en los resultados anteriores los planificadores que ofrecen las eficiencias más altas son *Best CQI* y *Max TP*. Sin embargo, en cuanto el número de UEs crece, los UEs con peores condiciones de canal se quedan sin eficiencia.

Por otra parte *Round Robin*, *Prop Fair Sun* y *Resource Fair* obtienen unos resultados similares, se puede ver que las eficiencias no varían demasiado entre ellos y que según el número de UEs cada uno obtiene mejores o peores resultados. Por ejemplo cuando hay 150 UEs *Resource Fair* supera levemente a los otros dos, mientras que con 30 UEs *Round Robin* es el que tiene mejor eficiencia media.

*Alpha Fair* cuando su valor alpha es 0,5 se comporta de manera bastante similar a *Round Robin*, *Prop Fair Sun* y *Resource Fair*.

*Max Min* no se comporta como debería en este caso, se ve claramente que los UEs con peores condiciones de canal o los que deberían obtener las eficiencias mínimas más altas, no las obtienen.

*Constrained* obtiene resultados dispares, aún para diferentes valores de alpha por eso no se tiene en cuenta.

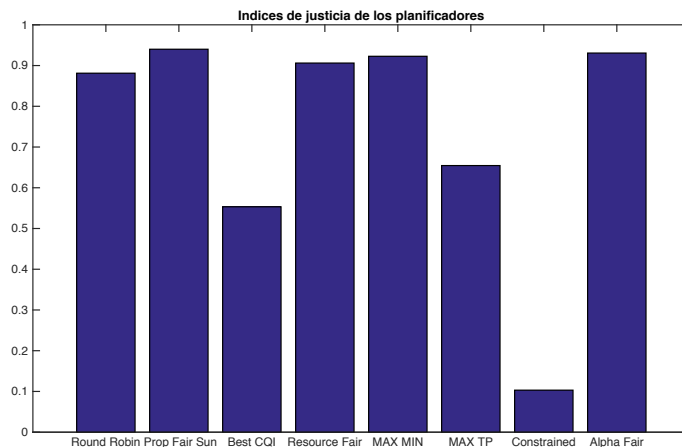


Figura 33. Indices de justicia de los planificadores

En la figura 33 se pueden ver los diferentes índices de justicia de todos los planificadores. Los que poseen los índices más altos son *Round Robin*, *Prop Fair Sun*, *Resource Fair*, *Alpha Fair* y *Max Min*. Por ello y por otras cualidades que poseen junto a la facilidad de implementarlos, *Round Robin* y *Prop Fair Sun* son de los planificadores más empleados.

## 4.4 Escenario 3

CONFIGURACIÓN	
eNodeB	19
UE/sector	2/10/50
UEs	114/570/2850
Frecuencia	2140 Mhz
Ancho de banda	20 Mhz
TTI	100

Este escenario muestra lo que sucede con algunas de las diferentes simulaciones que ofrece el simulador. Estas simulaciones contienen estructuras con múltiples eNodeB y UEs. No se han creado nuevas simulaciones para este escenario, sin embargo éstas si que contienen pequeñas modificaciones, además de algunos scripts extra que ha habido que implementar para dibujar alguna de las gráficas.

Las pruebas realizadas son las mismas para todos los tipos de simulaciones posibles. En ellas se estudian los modos de transmisión, pérdidas por trayecto, el desvanecimiento de pequeña escala, el desvanecimiento de gran escala y los planificadores. Todas estas pruebas se realizadas con UEs en las mismas posiciones para poder comparar.

### 4.4.1 Tri\_Sector

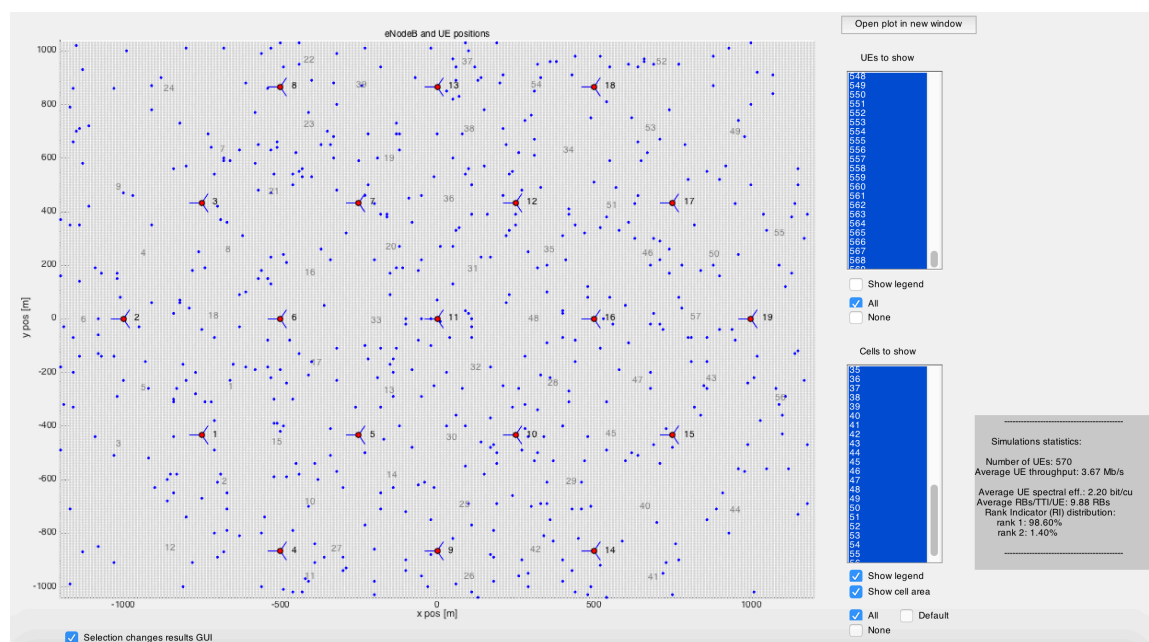


Figura 34. Mapa de eNodeBs y UEs en una simulación tipo tri\_sector

### 4.4.1.1 Resultados generales

La primera simulación analizada de las propuestas por el simulador es la llamada *'tri\_sector'*. Esta simulación está compuesta por 19 eNodeBs con tres sectores cada uno, formando un total de 57 celdas. Las configuraciones de los UEs analizados por eNodeB en el punto 4.4.1.1 son de 2, 10 y 50 UEs por sector, siendo un total de 6, 30 y 150 UEs por eNodeB. En el resto de pruebas se emplea la configuración de 10 UEs por celda que corresponde a 30 UEs por eNodeB y un total de 570 UEs en la simulación, se puede ver esta configuración en la figura 34.

El resto de parámetros empleados para este primer apartado son modo CLSM (2x2), modelo de pérdidas *TS36942* tipo urbano, canal *PedB*, desvanecimiento de gran escala *claussen*, planificador *round robin* y UEs desplazándose a 5 km/h.

<b>Resultados</b>					
<b>UEs totales</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
<b>6 UEs</b>					
114	19,18	2,29	38,81	5,18	38,35
<b>30 UEs</b>					
570	3,67	2,20	7,41	0,92	36,75
<b>150 UEs</b>					
2850	0,68	2,04	1,44	0,15	34,06

Tabla 14. Resultados simulación *tri\_sector*

En la tabla 14 se pueden ver los resultados obtenidos. Como es normal a medida que se aumenta el número de UEs por celda las eficiencias de éstos disminuyen, excepto la eficiencia por celda que es similar. La eficiencia espectral media también se mantiene constante. Se puede ver que si se dividiese la eficiencia de 19,18 Mb/s para 6 UEs entre 150 UEs se obtendría 0,77 Mb/s, que es un valor próximo al obtenido, es decir, la eficiencia parece que se reparte, aunque varía ligeramente por las condiciones de canal de cada UE en ese punto.

A modo de curiosidad se ha comprobado que sucede en los casos anteriores cuando un UE tiene un CQI igual, en concreto 7. Todos estos UEs se han medido en el eNodeB 11 celda 33 en posiciones cercanas, obteniendo 20,90 Mb/s para el UE 64 cuando se tienen 6 UEs por eNodeB, 3,49 Mb/s para el UE 327 cuando se tienen 30 UEs por eNodeB y 0,61 Mb/s para el UE 1611 cuando se tienen 50 UEs por eNodeB. Se puede ver en la tabla que la eficiencia media para cada configuración es similar a la eficiencia de cada configuración cuando su CQI es 7.

#### 4.4.1.2 Modos de transmisión

Los modos de transmisión estudiados son los de la tabla 15, SISO (1x1), TxD (2x2), OLSM (2x2) y CLSM (2x2)(4x4). El resto de parámetros son los mismos que en 4.4.1.1. El número de UEs por celda es 10 y por eNodeB 30 UEs.

<b>Modos de Transmisión</b>					
<b>Modo de transmisión</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
SISO	3,89	1,37	0,11	0,87	13,74
TxD	6,75	2,99	0,57	1,78	29,92
OLSM	6,20	2,79	0,50	1,70	27,93
CLSM (2x2)	7,41	3,67	0,92	2,20	36,75
CLSM (4x4)	13,87	6,31	1,58	3,78	63,13

Tabla 15. Modos de transmisión para una simulación *tri\_sector*

Se puede ver en la tabla 15 como la eficiencia aumenta a medida que se mejora el modo de transmisión, de hecho se obtiene más del triple al pasar de SISO a CLSM (4x4). Sin embargo se puede ver que disminuye ligeramente para OLSM respecto a TxD, esto no pasaba en casos anteriores cuando sólo había un eNodeB, aunque para una configuración 4x4 esto no sucede.

#### 4.4.1.3 Pérdidas por trayecto

Para realizar las mediciones de las pérdidas por trayecto ha habido que variar el tipo de antena empleado por la simulación *tri\_sector* por defecto. En concreto se ha modificado la antena *TS 36.942* por una *kathreinTSAntenna*. El resto de parámetros usados son los definidos por la simulación *tri\_sector* y los mismos del punto 4.4.1.1. Recordar que las mediciones se realizan para 10 UEs por sector.

<b>Pérdidas por trayecto</b>					
<b>Eficiencia (Mb/s)</b>	<b>TS36942 Urbano</b>	<b>TS36942 Rural</b>	<b>COST231 Urbano Macro</b>	<b>COST231 Urbano Macro + interior profundo</b>	<b>COST231 Suburbano Macro</b>
5%	1,31	0,92	1,21	0,14	1,22
Media	5,23	3,02	4,97	3,97	4,99
95%	11,80	6,38	10,58	8,82	10,61

Tabla 16. Pérdidas por trayecto para una simulación *tri\_sector*

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

En la tabla 16 se pueden ver los resultados obtenidos para esta simulación. Los modelos macroscópicos de pérdidas medidos son *TS36942* y *COST231* con sus diferentes entornos y pérdidas añadidas. Las eficiencias máximas que se obtienen en este tipo de simulación son para los casos tipo urbano. Se tiene aproximadamente un 90% de pérdida de eficiencia en todos los casos al pasar de la eficiencia pico al 95% a una eficiencia límite al 5%, esto es similar a un UE cercano al eNodeB frente a un UE alejado. Destacar que ahora la eficiencia es bastante menor en un entorno rural frente a uno urbano, a diferencia de lo que ocurría cuando sólo se empleaba un eNodeB y varios UEs, que las eficiencias eran similares en ambos casos.

### 4.4.1.4 Desvanecimiento de pequeña escala

<b>Desvanecimiento de pequeña escala</b>			
<b>Tipo de canal</b>	<b>Eficiencia (95%) (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%) (Mb/s)</b>
PedA	7,66	3,76	0,96
PedB	7,41	3,67	0,92
extPedB	7,41	3,62	0,90
VehA	7,41	3,63	0,94
VehB	7,38	3,61	0,95

*Tabla 17. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación tri\_sector*

En la tabla 17 se pueden ver los resultados obtenidos para los diferentes tipos de canal. La configuración empleada para esta prueba es la misma de 4.4.1.1 excepto el tipo de canal que varía según la prueba y la velocidad del UE que se fija a 5 km/h sólo para la tabla.

Como se puede ver en los resultados, cuando se mantiene la velocidad de desplazamiento fija, la eficiencia no varía demasiado aunque el canal sea diferente. Sí se observa un ligero descenso cuando se comparan canales homólogos, p. ej. PedB y VehB, pero el descenso producido cuando un UE se encuentra dentro de un vehículo es mínimo.

Igual que en el escenario 2 se han medido diferentes eficiencias variando las velocidades de desplazamiento de los UEs con y sin vehículos. Las velocidades empleadas también son las mismas que en el escenario 2, entre 0 km/h y 20 km/h cuando los UEs se desplazan a pie y entre 0 km/h y 1130 km/h cuando los UEs se desplazan en algún tipo de vehículo.



## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

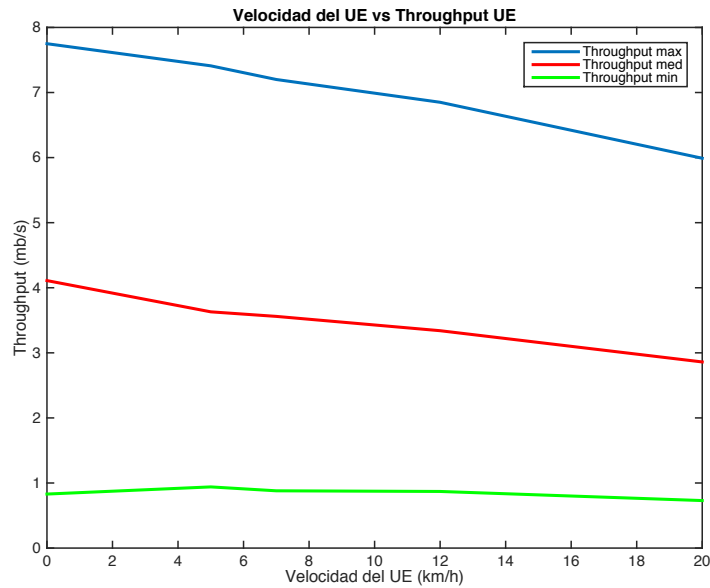


Figura 35. Velocidad desplazamiento de los UEs frente a su eficiencia para una simulación *tri\_sector*

En la figura 35 se pueden ver los resultados que se obtienen para los UEs desplazándose a diferentes velocidades a pie. En ella se observa que tanto la eficiencia máxima como la media descienden a medida que se aumenta la velocidad mientras que el mínimo se mantiene constante. Por otra parte en la figura 36 se ve como la eficiencia de los UEs desplazándose en vehículos desciende hasta que los UEs alcanzan los 50 km/h para luego mantenerse constante. Hay que matizar que estos resultados son teóricos y la velocidad máxima de los UEs vendrá delimitada por sus especificaciones y las de los eNodeBs.

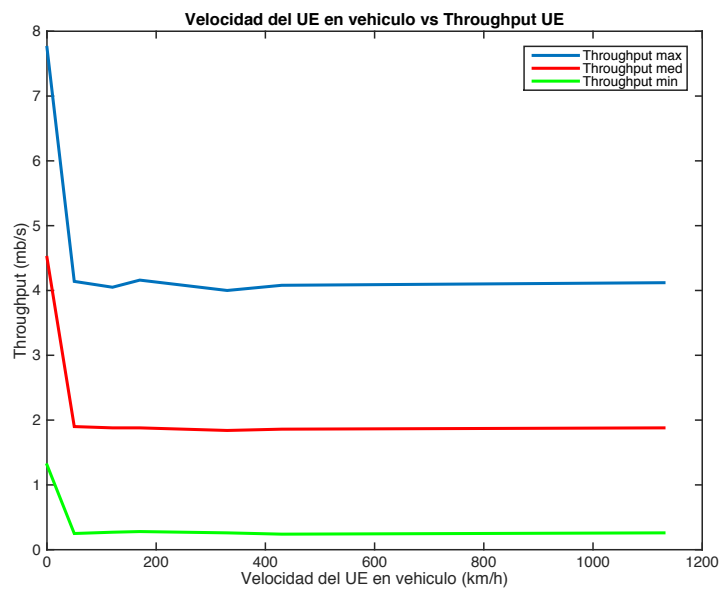


Figura 36. Velocidad desplazamiento de los UEs en vehículos frente a su eficiencia para una simulación *tri\_sector*

#### 4.4.1.5 Desvanecimiento de gran escala

Para poder medir que sucede con el desvanecimiento de gran escala también se ha tenido que modificar la antena *TS 36.942* por una *kathreinTSAntenna*. El resto de parámetros empleados son los del punto 4.4.1.1 y los que usa por defecto la simulación *tri\_sector*. Como se puede apreciar en la tabla 18 la velocidad de los UEs no sufre grandes variaciones al introducir desvanecimiento de gran escala, siendo curioso el hecho que en este caso se obtienen eficiencias medias y de pico mayores que sin desvanecimiento de gran escala. Esto es debido a la colocación de los UEs y al hecho de que haya dado la casualidad que se mejore el CQI de los UEs en esas posiciones, obteniendo así mayores eficiencias con desvanecimiento de gran escala.

<b>Desvanecimiento de gran escala</b>			
<b>Tipo de desvanecimiento</b>	<b>Eficiencia (95%) (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%) (Mb/s)</b>
Claussen	11,80	5,23	1,31
None	10,52	5,31	1,81

Tabla 18. Desvanecimiento de gran escala para una simulación *tri\_sector*

#### 4.4.1.6 Planificadores

<b>Planificadores</b>			
<b>Tipo de planificador</b>	<b>Eficiencia (95%) (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%) (Mb/s)</b>
Round Robin	7,41	3,67	0,92
Prop Fair Sun	7,84	4,45	1,46
Best CQI	47,95	7,24	0
Max Min	5,34	3,54	1,30

Tabla 19. Planificadores para una simulación *tri\_sector*

En esta ocasión se han elegido los planificadores más comunes para las mediciones. El resto de parámetros son los de la simulación. En la tabla 19 se pueden ver los resultados. En la tabla se puede ver que los resultados son acordes a las características de los planificadores excepto para el planificador *Max Min*, éste debería obtener un valor máximo para la eficiencia límite 5%, sin embargo *Prop Fair Sun* obtiene mejores resultados.

## 4.4.2 Tri\_Sector\_plus\_femtocells

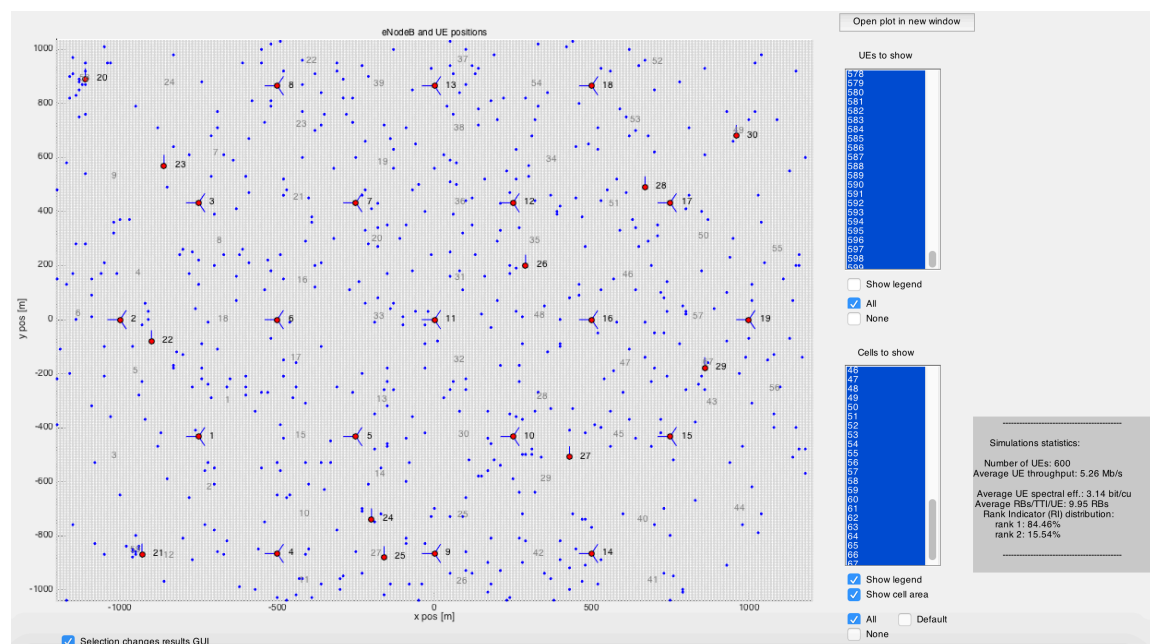


Figura 37. Mapa de eNodeBs y UEs en una simulación tipo *tri\_sector\_plus\_femtocells*

### 4.4.2.1 Resultados generales

La segunda simulación analizada de las propuestas por el simulador es *tri\_sector\_plus\_femtocells*. Esta simulación se parece a su homóloga *tri\_sector* en cuanto a definición y colocación, con el añadido de femtoceldas. La simulación está compuesta por 19 eNodeBs divididos a su vez en 3 celdas o sectores, sumando un total de 57 celdas, por otra parte se añaden 11 femtoceldas las cuales sólo poseen una celda sumando un total de 11 celdas, lo cual deja la simulación en un total de 68 celdas. Se puede ver la interfaz 2 de esta simulación en la figura 37.

El resto de la configuración viene definida por la simulación, que inicialmente emplea un sistema MIMO CLSM 2x2, pérdidas por trayecto tipo *TS36942* en entorno urbano, un canal *Winner+* que se ha modificado a *PedB*, desvanecimiento de gran escala, planificador *Round Robin* y UEs con una velocidad de desplazamiento de 5 km/h.

De la misma manera que antes, la primera prueba se ha realizado para medir la eficiencia pico 5%, la eficiencia media, la eficiencia límite 95%, la eficiencia por celda y la eficiencia espectral media. El número de UEs estudiados por celda es 2, 10 y 50. Esto supone un total de 6, 30 y 150 UEs por eNodeB + 6, 30 y 150 UEs repartidos en 11 femtoceldas, sumando un total de 120, 600 y 3000 en todo el conjunto, respectivamente. Esta configuración de UEs sólo se emplea en el punto 4.4.2.1, en el resto de pruebas de esta simulación los resultados son para 10 UEs por celda y 30 extra repartidos por 11 femtoceldas.

<b>Resultados</b>					
<b>UEs totales</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
<b>6 UEs por eNodeB + 6 UEs por 11 femtoceldas</b>					
120	23,92	2,86	54,05	5,83	42,21
<b>30 UEs por eNodeB + 30 UEs por 11 femtoceldas</b>					
600	5,26	3,14	11,13	1,37	46,44
<b>150 UEs por eNodeB + 150 UEs por 11 femtoceldas</b>					
3000	0,97	2,91	2,00	0,24	43,00

Tabla 20. Resultados simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

En la tabla 20 se pueden ver los resultados obtenidos para las diferentes configuraciones de UEs. Se aprecia que los resultados son similares a *tri\_sector* mejorando sus eficiencias, por ejemplo la eficiencia media mejora entre un 20% y 30%. Esto se debe a que el ratio de UEs por celda decrece, antes su mayor ratio era 50 UEs por celda y ahora pasa a ser 44 cuando se tienen 3000 UEs en la simulación. La eficiencia por celda así como la eficiencia espectral media también mejoran, esto se debe a la ayuda de las femtoceldas. Finalmente, la pérdida de eficiencia generalizada es un 95% al pasar de una red poco saturada con 2 UEs a una red más saturada con 50 UEs.

#### 4.4.2.2 Modos de transmisión

<b>Modos de Transmisión</b>					
<b>Modo de transmisión</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
SISO	6,96	2,69	0,26	1,64	23,75
TxD	8,39	4,31	0,85	2,57	38,03
OLSM	11,05	4,51	0,87	2,70	39,78
CLSM (2x2)	11,13	5,26	1,37	3,14	46,44
CLSM (4x4)	22,85	9,78	2,15	5,83	86,29

Tabla 21. Modos de transmisión para una simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

Los modos de transmisión medidos tienen configuraciones 1x1 (SISO), 2x2 (TxD, OLSM y CLSM) y 4x4 (CLSM). El resto de la configuración empleada es la que viene por defecto en el simulador y definida en el punto 4.4.2.1.

Los resultados se pueden ver en la tabla 21. El modo más beneficiado al añadir femtoceldas es SISO, se consigue prácticamente duplicar su eficiencia en todos los casos

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

frente a *tri\_sector*. Además se consigue una gran mejora de eficiencia para todos los modos. Hay que tener en cuenta que las antenas transmisoras son diferentes, mientras que *tri\_sector* emplea una antena tipo TS 36.942, la simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells* emplea una antena *kathreinTSAntenna*.

### 4.4.2.3 Pérdidas por trayecto

Pérdidas por trayecto					
Eficiencia (Mb/s)	TS36942 Urbano	TS36942 Rural	COST231 Urbano Macro	COST231 Urbano Macro + interior profundo	COST231 Suburbano Macro
5%	1,37	1,15	1,22	0,00	1,17
Medio	5,26	3,42	4,78	3,97	4,85
95%	11,13	7,25	10,00	9,08	10,21

Tabla 22. Pérdidas por trayecto para una simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

Para medir las pérdidas por trayecto esta vez no ha habido que variar la antena transmisora como pasaba en *tri\_sector*. El resto de los parámetros empleados son los definidos en *tri\_sector\_plus\_femtocells* y en el punto 4.4.2.2 de esta memoria.

En la tabla 22 se pueden ver los resultados obtenidos. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el punto 4.4.1.3 para *tri\_sector*, se ve que en algunos casos mejora la eficiencia al añadir femtoceldas pero en otros no. Si se analiza en profundidad el mapa de como están colocados los UEs y el CQI que les corresponde, se ve que a veces es menor con femtoceldas. Esa es la razón de que la eficiencia sea a veces menor con femtoceldas. Al igual que sucedía en *tri\_sector*, en entornos urbanos sigue siendo superior el uso del modelo TS36942.

### 4.4.2.4 Desvanecimiento de pequeña escala

Manteniendo la configuración original de la simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells* se han medido las eficiencias para los diferentes tipos de canal. En la tabla 22 se pueden ver los resultados obtenidos. Estos resultados varían respecto a los resultados obtenidos con *tri\_sector*. Como se puede ver en la tabla, se obtiene una eficiencia superior en todos los casos, en concreto del orden de 4Mb/s extra para la eficiencia pico 95%, 2 Mb/s extra para la eficiencia media y 0,5 Mb/s extra para la eficiencia límite 5%. Hay que tener en cuenta que aparte de haberle añadido femtoceldas, también ha variado el tipo de antena transmisora.

Respecto a las eficiencia medias, se aprecia la superioridad de los canales A, PedA y VehA. Aunque si se quiere conseguir la mayor eficiencia posible para eficiencias pico

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

95% y a pie, se ha de usar PedB. En el caso de *tri\_sector* el canal A obtenía las velocidades puntas.

<b>Desvanecimiento de pequeña escala</b>			
<b>Tipo de canal</b>	<b>Eficiencia (95%) (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%) (Mb/s)</b>
PedA	10,41	5,28	1,39
PedB	11,13	5,26	1,37
extPedB	11,10	5,23	1,36
VehA	11,42	5,24	1,28
VehB	10,97	5,17	1,37

Tabla 23. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

Esta vez no se ha representado la variación de eficiencia frente a las velocidades de los UEs a pie o en vehículos, dado que las gráficas producen resultados similares. Cuando los UEs se desplazan a pie, la eficiencia media disminuye según se aumenta la velocidad y cuando los UEs se desplazan en vehículo, la eficiencia media disminuye al principio y luego tiende a estabilizarse. Hay que recordar que la distancia máxima entre un eNodeB y otro, o una femtocelda es de 500 metros.

### 4.4.2.5 Desvanecimiento de gran escala

<b>Desvanecimiento de gran escala</b>			
<b>Tipo de desvanecimiento</b>	<b>Eficiencia (95%) (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%) (Mb/s)</b>
Claussen	11,13	5,26	1,37
None	11,72	5,93	2,09

Tabla 24. Desvanecimiento de gran escala para una simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

Como es habitual, la configuración se mantiene para medir lo que sucede con el desvanecimiento de gran escala. En la tabla 24 se pueden ver los resultados obtenidos. Esta vez las antenas transmisoras de los eNodeBs son las mismas que en la simulación tipo *tri\_sector*, se emplean antenas tipo *kathreinTSAntenna*.

Observando los resultados se puede ver que respecto a *tri\_sector* se mejoran todos las eficiencias excepto para eficiencias pico 95% con desvanecimiento de gran escala. La mejora de eficiencia con femtoceldas es mayor cuando no hay desvanecimiento de gran escala, que cuando si hay, en concreto mejoran un 12% y un 0,5%, respectivamente.

## 4.4.2.6 Planificadores

Planificadores			
Tipo de planificador	Eficiencia (95%) (Mb/s)	Eficiencia media (Mb/s)	Eficiencia (5%) (Mb/s)
Round Robin	11,13	5,26	1,37
Prop Fair Sun	9,08	5,94	2,26
Best CQI	80,80	11,08	0,00
Max Min	9,86	5,38	2,44

Tabla 25. Planificadores para una simulación *tri\_sector\_plus\_femtocells*

La última prueba para este tipo de simulación ha sido comprobar como afectan los diferentes planificadores. Se emplea la configuración por defecto definida por la simulación. La antena transmisora que emplean los eNodeBs es la *kathreinTSAntenna*, a diferencia de *tri\_sector*; que para la prueba de los planificadores emplean *TS 36.942*.

Como se puede ver en la tabla 25, los resultados mejoran considerablemente respecto a *tri\_sector*. *Round Robin* ahora tiene una eficiencia mayor que *Prop Fair Sun* para eficiencias pico 95%, en cambio la eficiencia media es similar. Al emplear *Best CQI*, casi se consigue duplicar la eficiencia máxima respecto a *tri\_sector*. Ahora, *Max Min* si obtiene la mayor eficiencia posible para eficiencias límite 5%, comparándolo con el resto de planificadores.

Por otra parte, si se comparan con los resultados obtenidos en el escenario 2, cuando sólo se tenía un eNodeB y 30 UEs por eNodeB, se ve que la eficiencia media es casi la mitad para todos los planificadores. También son menores las eficiencias tanto para eficiencias pico 95% y eficiencias límite 5%. El único caso en que se supera al escenario 2, es el planificador *Best CQI*, que en la eficiencia pico 95% duplica casi al anterior.

### 4.4.3 Omnidirectional\_eNodeBs

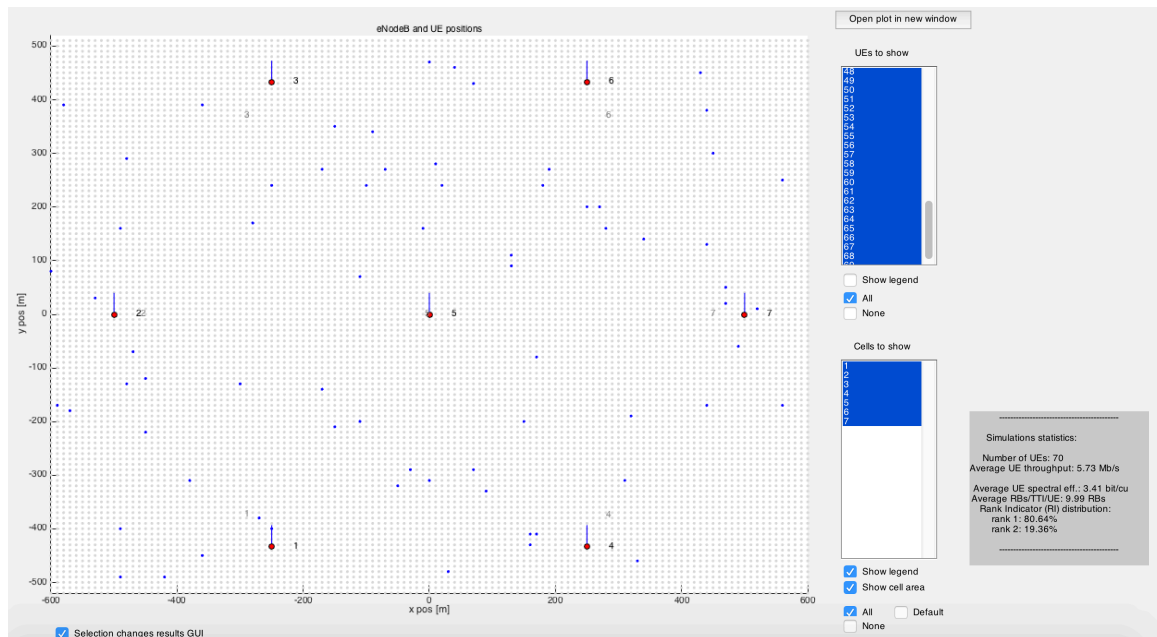


Figura 38. Mapa de eNodeBs y UEs en una simulación tipo *omnidirectional\_eNodeBs*

#### 4.4.3.1 Resultados generales

La tercera de las simulaciones estudiadas también proporcionada por el simulador es *Omnidirectional\_eNodeBs*. Esta simulación a diferencia de todas las empleadas anteriormente en este proyecto, posee eNodeBs con un sólo sector o celda. En concreto la simulación cuenta con 7 eNodeBs, con 1 celda cada uno, sumando un total de 7 celdas o sectores. El número total de UEs por celda es el mismo que el número total de UEs por eNodeB, al ser unicelda. Igual que las veces anteriores primero se muestra el panorama global al simular situaciones con diferente número de UEs, en concreto 2, 10 y 50 UEs por eNodeB, para finalmente estudiar de manera más específica el resto de casos con 10 UEs por eNodeB.

La configuración definida por la simulación es un sistema MIMO CLSM 2x2 con pérdidas por trayecto tipo *TS36942* en un entorno urbano, canal tipo *winner+* aunque para el proyecto se emplea *PedB*, sin desvanecimiento de gran escala, UEs por celda constantes a una velocidad de 5 km/h, antena transmisoras tipo *omnidireccional* y planificador tipo *Round Robin*.

En la figura 38 se puede ver la representación con el mapa de eNodeBs y UEs empleado durante las pruebas, en concreto muestra la configuración de 10 UEs por celda o sector.



<b>Resultados</b>					
<b>UEs totales</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
<b>2 UEs</b>					
14	37,58	4,47	83,99	10,80	75,16
<b>10 UEs</b>					
70	5,73	3,41	16,22	1,47	57,25
<b>50 UEs</b>					
350	1,11	3,31	2,82	0,34	55,56

Tabla 26. Resultados simulación omnidireccional\_eNodeBs

En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos. Como se puede observar, todas las eficiencias han mejorado respecto a las simulaciones *tri\_sector* y *tri\_sector\_with\_femtocells*. Hay que recordar que el número de UEs totales es menor, donde antes se tenían máximos de 2850 y 3000 UEs, ahora se tiene un máximo de 350 UEs para este tipo de simulación. También han mejorado la eficiencia por celda y la eficiencia espectral media respecto a las dos simulaciones anteriores.

Las variaciones de eficiencia producidas para este tipo de simulación son las siguientes. Cuando sólo hay 2 UEs por eNodeB se reduce un 87% al pasar de eficiencia pico 95% a eficiencia límite 5%, en el caso de 10 UEs por eNodeB la eficiencia se ve afectada en un descenso del 90% al pasar de su eficiencia máxima a mínima y finalmente en el caso de 50 UEs, las pérdidas son del 88%. Con lo cual el caso más afectado para esta configuración es el que tiene 10 UEs por sector.

#### 4.4.3.2 Modos de transmisión

<b>Modos de Transmisión</b>					
<b>Modo de transmisión</b>	<b>Eficiencia (95%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia media (Mb/s)</b>	<b>Eficiencia (5%)(Mb/s)</b>	<b>Eficiencia espectral media (bit/cu)</b>	<b>Eficiencia por celda (Mb/s)</b>
SISO	8,55	2,75	0,34	1,69	27,53
TxD	8,42	4,25	1,05	2,53	42,46
OLSM	16,01	4,95	0,94	2,95	49,46
CLSM (2x2)	16,22	5,73	1,47	3,41	57,25
CLSM (4x4)	29,76	10,35	2,56	6,16	103,51

Tabla 27. Modos de transmisión para una simulación omnidireccional\_eNodeBs

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

Los modos de transmisión que se estudian son del 1 al 4 para configuraciones 1x1 (SISO), 2x2 (TxD, OLSM y CLSM) y 4x4 (CLSM). El resto de la configuración es la definida por *omnidirectional\_eNodeBs* y en el punto 4.4.3.1.

En la tabla 27 se pueden ver los resultados obtenidos. Respecto a las dos configuraciones anteriores, se puede ver como si mejoran las eficiencias frente a *tri\_sector*, pero frente *tri\_sector\_with\_femtocells* se mantienen similares, incluso usando TxD en *tri\_sector\_with\_femtocells* supera en eficiencia media. Teniendo en cuenta que *tri\_sector\_with\_femtocells* contiene más UEs en el mismo espacio, ésto es un indicador de las ventajas de dividir en celdas los eNodeBs.

Igual que en las veces anteriores, CLSM 4x4 es el modo de transmisión más potente. La diferencia entre usar un modo de transmisión simple o MIMO es determinante. Para esta simulación concreta, la mejora de pasar de una configuración 1x1 a 2x2 es del orden de un 55% a un 110% y entre cambiar de una configuración 1x1 a 4x4, la mejora es de un 276%.

### 4.4.3.3 Pérdidas por trayecto

<b>Pérdidas por trayecto</b>					
<b>Eficiencia (Mb/s)</b>	<b>TS36942 Urbano</b>	<b>TS36942 Rural</b>	<b>COST231 Urbano Macro</b>	<b>COST231 Urbano Macro + interior profundo</b>	<b>COST231 Suburbano Macro</b>
5%	1,47	1,47	1,42	0,20	1,44
Medio	5,73	4,36	5,26	2,62	5,29
95%	16,22	7,77	14,60	10,48	14,44

Tabla 28. Pérdidas por trayecto para una simulación *omnidirectional\_eNodeBs*

Para medir como afectan las pérdidas por trayecto para este tipo de simulación, se mantiene la configuración original de dicha simulación mostrada en el punto 4.4.3.1.

En la tabla 28 se pueden ver los resultados obtenidos. Las eficiencias obtenidas para los diferentes casos, son similares, aunque mejores a los obtenidos con *tri\_sector\_with\_femtocells*. De hecho, la única eficiencia media mejor que en la simulación anterior, es para el de tipo de pérdidas COST231 en entornos urbanos dentro de lugares profundos, pero hay que recordar que ahora el número de UEs con eNodeBs omnidireccionales es menor.

Respecto a los resultados, se ve que en entornos urbanos el modelo de pérdidas que mejor funciona es TS36942. En entornos rurales, la eficiencia media no disminuye demasiado respecto a los urbanos. Finalmente, el entorno peor parado es el de tipo urbano al añadir pérdidas de interior.

#### 4.4.3.4 Desvanecimiento de pequeña escala

Desvanecimiento de pequeña escala			
Tipo de canal	Eficiencia (95%) (Mb/s)	Eficiencia media (Mb/s)	Eficiencia (5%) (Mb/s)
PedA	15,32	5,70	1,58
PedB	16,22	5,73	1,47
extPedB	15,61	5,65	1,62
VehA	16,01	5,76	1,62
VehB	15,93	5,71	1,54

Tabla 29. Desvanecimiento de pequeña escala para una simulación omnidireccional\_eNodeBs

La configuración utilizada para ver lo que sucede con los diferentes canales, es la del punto 4.4.3.1. En la tabla 29 se pueden ver los resultados obtenidos. Los canales con mejores eficiencias medias para UEs a pie o en vehículo, son *PedB* y *VehA*, respectivamente. También son los canales que mejores eficiencias obtienen con eficiencia pico 95%. Sin embargo para eficiencia límite 5%, aunque *VehA* sigue liderando, el vencedor de los canales a pie en este caso es *extPedB*.

Si se comparan los resultados con las simulaciones analizadas anteriormente, se puede observar que las eficiencias medias son similares a *tri\_sector\_with\_femtocells* y superiores a *tri\_sector*. Aunque hay que recordar que ahora el número de UEs es mucho menor, 70 frente a los 600 y 570 de antes. Respecto a las eficiencias límite 5% y pico 95%, sucede la misma situación.

Mencionar, que tampoco se ha realizado esta vez una gráfica para las diferentes velocidades de los UEs, ya que como en los casos anteriores, la eficiencia se estabiliza a partir de los 50 km/h. Ésto sucede en las simulaciones ya que las distancias son muy cortas, en la realidad, a medida que se alejan los UEs, a mayores velocidades menores throughputs. Además, las velocidades máximas vienen delimitadas por las especificaciones técnicas de los UEs y de los eNodeBs.

#### 4.4.3.5 Desvanecimiento de gran escala

Para este tipo de simulación, no se ha podido medir que sucede cuando hay desvanecimiento de gran escala, ya que para la versión de simulador empleada en este proyecto, no permite aún añadir desvanecimiento de gran escala a los eNodeBs omnidireccionales.

## 4.4.3.6 Planificadores

Planificadores			
Tipo de planificador	Eficiencia (95%) (Mb/s)	Eficiencia media (Mb/s)	Eficiencia (5%) (Mb/s)
Round Robin	16,22	5,73	1,47
Prop Fair Sun	11,38	6,23	2,84
Best CQI	64,54	12,07	0,00
Max Min	11,59	5,73	3,52

Tabla 30. Planificadores para una simulación omnidireccional\_eNodeBs

La configuración empleada para el estudio de los planificadores es la que viene por defecto y la citada en el punto 4.4.3.1.

En la tabla 30 se pueden ver los resultados obtenidos. Esta vez, si se cumple que el planificador *Max Min*, otorga la mayor eficiencia posible para eficiencia límite 5%. Para este tipo de simulación *Prop Fair Sun* y *Round Robin* actúan de forma pareja, el primero es más adecuado si se quiere una eficiencia mayor de media o límite 5% y el segundo, es más adecuado cuando se desea una eficiencia mayor para eficiencia pico 95%. *Best CQI* proporciona la eficiencia a los UEs con mejor CQI obteniendo 64,54 Mb/s máximos.

Si se compara la tabla anterior con la de otras simulaciones anteriores, como *tri\_sector* o *tri\_sector\_with\_femtocells*, se puede ver como todas las eficiencias son superiores, excepto *Best CQI*, que *tri\_sector\_with\_femtocells* obtiene los mejores resultados. Siempre recordando que el número de UEs es menor en *omnidireccional\_eNodeBs*. Sin embargo, si se compara con el escenario de un eNodeB y varios UEs, se ve que éste, al estar poco saturado y no verse afectado por otros eNodeBs de alrededor, obtiene mejores resultados.

## 4.5 Escenario 4

En este último escenario se realizan mediciones de la eficiencia en situaciones reales. A priori, esto puede parecer una tarea fácil, sin embargo, existen muchos factores desconocidos por parte de un usuario cuando emplea un equipo. Aunque se han tenido que realizar algunas suposiciones, en este proyecto se ha tratado de ser lo más riguroso posible con los medios disponibles.

### 4.5.1 Metodología de las mediciones

El equipo empleado para estas pruebas ha sido un Iphone 6 Plus equipado con un chipset Qualcomm MDM9625 [22] que soporta LTE Cat. 4 [23], que como define la ITU en la versión 8 y las propias especificaciones del dispositivo, supone una eficiencia máxima de descarga de 150 Mb/s y una eficiencia máxima de subida de 50 Mb/s, además de soportar un sistema MIMO 2x2 [24].

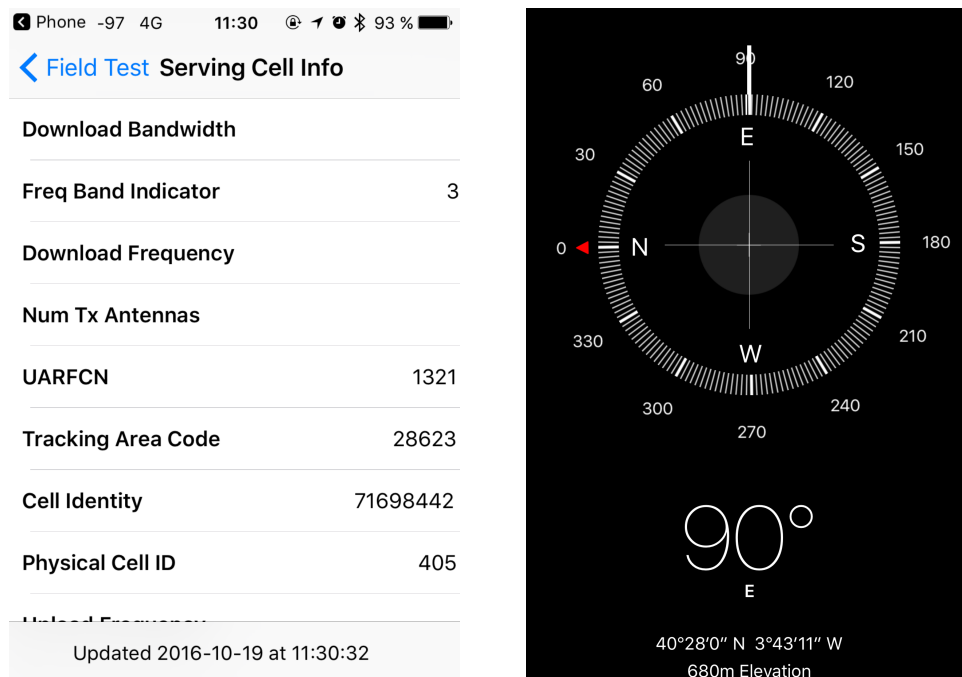


Figura 39. Modo Field Test del Iphone, en la izquierda y aplicación brújula del Iphone, en la derecha.

Entre las diferentes aplicaciones empleadas en el Iphone, se ha usado el modo 'Field test' del propio dispositivo, para determinar que eNodeB utiliza el Iphone y cerciorarse que los test de eficiencia se realizan sobre la misma celda. Aparte, dicha aplicación también se ha empleado para extraer otros datos como son la frecuencia, el ancho de

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

banda, el código de área del eNodeB, el número de celdas y la potencia transmitida entre otros. Mencionar, que dependiendo del operador y eNodeB que se esté usando, la aplicación proporciona más o menos datos. Para las pruebas de este proyecto se ha utilizado Movistar y dos eNodeBs que proporcionan los datos necesarios. Otra aplicación empleada, es la brújula, para determinar la posición exacta del UE junto con la elevación. Finalmente, para medir la eficiencia de una manera más precisa, se han empleado diferentes aplicaciones y servicios web, entre ellos Speedtest y fast.com. En la figura 39 se pueden ver las aplicaciones 'Field test' y brújula.

Aparte de las aplicaciones móviles, se han empleado otros servicios y aplicaciones. Para verificar la posición aproximada de los eNodeBs, se ha utilizado el servicio de *Combain Positioning solutions* (figura 40), el cual mediante el MCC, MNC, el código de localización de área y la identidad de la celda, extraídos del modo 'Field test', proporciona la posición aproximada del eNodeB y la cobertura. Una vez sabida la posición aproximada del eNodeB, se contrasta con un servicio web llamado *antenasgsm.com* para determinar la posición exacta de dicho eNodeB. También se ha comprobado el nivel de señal en la zona, mediante el mapa de cobertura que ofrece Movistar, ya que es la compañía que proporciona la cobertura del terminal empleado. Finalmente, también se emplea Google Maps junto con Paintbrush para medir la distancia de los UEs a los eNodeBs y representarlos en las posiciones.

El proceso seguido para realizar las mediciones, ha sido el siguiente:

- Determinar el eNodeB y celda que proporciona señal al UE, mediante 'Field Test'.
- Buscar la posición aproximada y después la exacta del eNodeB.
- Determinar la potencia de la señal recibida en dBm.
- Comprobar la posición exacta y altura del UE.
- Calcular distancia del UE al eNodeB.
- Tomar resto de datos, velocidad del UE, entorno, canal, etc.
- Realizar 3 mediciones de eficiencia en el mismo punto.

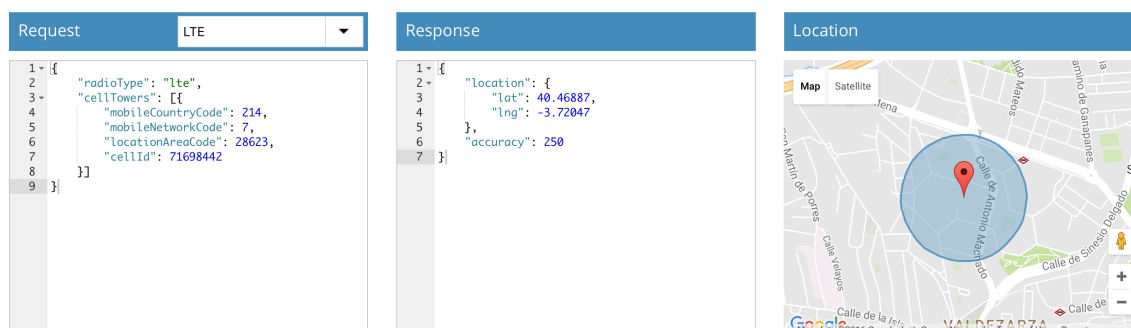



Figura 40. Localización de un eNodeB mediante Combain Positioning Solutions

## 4.5.2 Mediciones de los eficiencias

### 4.5.2.1 eNodeB 71698442

eNodeB 71698442	
Estación de telefonía móvil	
TELEFONICA MÓVILES ESPAÑA S.A.U - 2803513	
Dirección: C. Antonio Machado, 37. MADRID	
Localización: 40° 27' 59" N 3° 43' 12,3" O	
Área: 28623	
Cobertura aprox. : 18 Ha.	
MCC: 214	
MNC: 7	
Frecuencia: 1805,10-1825,10 Mhz	
Ancho de banda: 15 Mhz	
Tipo de entorno: Urbano	
UEs máximos: 3600 [25]	

El primer eNodeB analizado se encuentra en el barrio 94 (Valdezarza) del distrito Moncloa-Aravaca, que en el último censo del 2016, tiene una densidad de población de 210,41 Habitantes/Hectárea [26]. El eNodeB cubre aproximadamente 18 hectáreas, es decir, tiene un alcance para cubrir 3787 habitantes en dicho barrio. Según la CNMC, Movistar tiene una cuota de mercado del 34% propio [27], más un 1% generado por otros operadores a los que cede cobertura, esto reduce a 1325 los habitantes con acceso a este eNodeB.

A partir de aquí se han realizado algunas suposiciones para estimar el número aproximado de UEs. La cuota de Smartphones en España es del 71% (940 UEs) [28], el tráfico de la red LTE (comercialmente 4G) supone un 60% (564 UEs), puede haber otros dispositivos que hagan uso de la red, transeúntes que se encuentren en la zona, habitantes de dicho barrio que no se encuentren en la zona, habitantes que tengan el dispositivo apagado, habitantes que sólo estén conectados al eNodeB pero no lo estén empleando, variación de terminales según la hora, etc. Con todos estos factores se ha estimado que el número de UEs empleando el eNodeB 71698442 varía entre 300 y 600.

El resto de datos técnicos del eNodeB 71698442 como la frecuencia, el ancho de banda, el tipo de entorno, el número máximo de UEs capaz de soportar, localización exacta, etc, se pueden ver en el cuadro de datos sobre estas líneas junto con una fotografía del eNodeB.

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

eNodeB 71698442									
UE	Posición UE (coordenadas)	Distancia UE eNodeB (m)	Fecha y hora	Canal	Entorno	Vel. UE (km/h)	Nivel de señal (dBm)	Eficiencia (Mb/s)	Latencia (ms)
1	40° 28' 2" N 3° 43' 11" O	97,76	17/10/16 22:14	Veh	Ext.	50	-80	81,87	23
2	40° 28' 1" N 3° 43' 11" O	67,03	17/10/16 22:22	Veh	Ext.	50	-80	82,88	26
3	40° 28' 4" N 3° 43' 20" O	237,49	17/10/16 22:31	Ped	Ext.	7	-100	26,39	53
4	40° 28' 10" N 3° 43' 8" O	344,70	17/10/16 22:39	Ped	Ext.	0	-82	79,56	33
5	40° 28' 3" N 3° 43' 10" O	137,77	18/10/16 12:33	Ped	Ext.	7	-80	62,33	36
6	40° 28' 7" N 3° 43' 11" O	262,56	18/10/16 12:40	Ped	Int.+	0	-112	37,53	27
7	40° 28' 13" N 3° 43' 13" O	434,75	18/10/16 12:49	Ped	Ext.	0	-106	37,35	34
8	40° 28' 11" N 3° 43' 20" O	414,12	18/10/16 13:01	Ped	Ext.	5	-102	26,81	89
9	40° 27' 59,4" N 3° 43' 13" O	21,03	18/10/16 13:14	Ped	Ext.	0	-74	30,71	24
10	40° 28' 0,5" N 3° 43' 10" O	71,30	19/10/16 11:30	Ped	Int.	0	-97	33,91	28

Tabla 31. Mediciones reales para eNodeB 71698442

En la tabla 31 se pueden ver las medidas realizadas. Esta tabla indica el número que se le ha asignado a cada UE para luego poder identificarlo fácilmente en el mapa, la posición exacta mediante coordenadas geográficas de donde se encontraba el UE a la hora de realizar la medida, la distancia exacta del UE al eNodeB en línea recta medida en metros, la fecha y hora de cuando se realizó la medida de la eficiencia, el tipo de canal vehículo o pedestre, tipo de entorno exterior o interior o muy interior, velocidad a la que se desplazaba el UE en ese momento, nivel de señal captada en el momento de la medición, eficiencia de descarga y la latencia.

La primera franja de mediciones realizadas el 17 de octubre a una hora tardía, se refleja en los UEs 1, 2, 3, 4 y muestra cuatro medidas para dos canales diferentes vehicular y pedestre. El número de UEs a esas horas es menor, se puede considerar el estimado, 300 UEs. En las cuatro medidas realizadas se ve como se obtiene una eficiencia mayor cuando el nivel de señal es mayor, influyendo menos la distancia. Los UEs 1 y 2 con el mismo nivel de señal, idéntico canal y velocidad del UE, muestran como la eficiencia es ligeramente mayor para una distancia ligeramente menor. El UE 4 a pie y estático, pero con una señal similar a los UEs 1 y 2, aunque una distancia bastante mayor, muestra una eficiencia similar. El UE 3 con una señal bastante menor y una distancia menor que el UE 4, obtiene una eficiencia peor.





## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

COST231. Si además se le añaden las pérdidas extra, por ejemplo de interiores como el UE 10 medido dentro de la biblioteca pública Julio Cortazar, o interiores profundos como el UE 6 medido dentro de un garaje, la disminución de eficiencia se acentúa. En concreto al añadir las pérdidas extra de interior e interior profundo, pierden un 52% y 60%, respectivamente.


La siguiente comparación pertenece al canal y la velocidad de desplazamiento de los UEs, en concreto se han medido UEs a pie y en vehículo a 0, 5 y 7 km/h para los primeros y 50 km/h para los segundos. Al realizar las pruebas con el simulador y *tri\_sector* ya se veía que al variar de un canal a otro tampoco influenciaba demasiado en la eficiencia, además como se ve en las figuras 35 y 36 la velocidad del UE afecta más en los UEs a pie cuando tienen mejor señal y los UEs en vehículos durante los primeros 50 km/h. Si se compara el UE 1 y 2 con el UE 4 cuyas medidas fueron realizadas en horas similares, se puede ver como el tipo de canal o velocidad del UE no influye demasiado si se percibe la misma señal. Con los UEs 3 y 5, a la misma velocidad de desplazamiento, se ve como afecta más el número de UEs empleando el eNodeB o el nivel de señal, que el canal o la velocidad de desplazamiento de los UEs.

El desvanecimiento de gran escala tampoco se pueden comparar directamente, ya que en un entorno urbano real como el que se han realizado estas medidas siempre habrá absorción, reflexión, dispersión y difracción debido a los diferentes obstáculos como edificios, vehículos, UEs, etc y por tanto desvanecimiento de gran escala. Sin embargo, si se puede ver como afecta el desvanecimiento de gran escala en la realidad. Por ejemplo, si se observan las medidas de los UEs 3 y 4 realizadas aproximadamente a la misma hora y el mismo día, se observa como la eficiencia del UE 3 es mucho menor estando a una distancia menor, esto se debe al CQI y al desvanecimiento de gran escala.

Finalmente, los planificadores tampoco se pueden comparar debido a que no se dispone información de los planificadores empleados por los eNodeBs de Movistar, probablemente se emplee alguno común y con un índice alto de justicia como puede ser *Round Robin*, *Prop Fair* o *Resource Fair* con el fin de proporcionar eficiencia con señales altas y bajas, diferentes números de UEs, etc, pero no se puede asegurar con la información disponible. Aparte que cuando la señal es muy baja, el propio terminal del usuario busca usar otras redes disponibles con mejor señal, cambiando a 2G o 3G.

Con los resultados anteriores, se puede concluir el simulador es una herramienta precisa a la hora de mostrar lo que sucede en un entorno urbano para una red LTE.

### 4.5.2.2 eNodeB 71735326

eNodeB 71735326	
Estación de telefonía móvil	
TELEFONICA MÓVILES ESPAÑA S.A.U - 2800930	
Dirección: Av. Complutense, 2. MADRID	
Localización: 40° 27' 6,9" N 3° 43' 31,8" O	
Área: 28622	
Cobertura aprox.: 19 Ha.	
MCC: 214	
MNC: 7	
Frecuencia: 1805,10-1825,10 Mhz	
Ancho de banda: 15 Mhz	
Tipo de entorno: Suburbano	
UEs máximos: 3600 [25]	

El segundo eNodeB analizado se encuentra en el barrio 93 (Ciudad Universitaria) del distrito Moncloa-Aravaca, que en el último censo del 2016 tiene una densidad de población de 11,24 Habitantes/Hectárea [26]. Aunque a diferencia del barrio 94, se estima que un día de diario por la mañana la población crece en 250000 habitantes debido al flujo de estudiantes, siendo la densidad 186,66 Habitantes/Hectárea. El eNodeB cubre aproximadamente 18,6 hectáreas, dando servicio a 209 UEs o 3470 UEs en horas punta. Sabiendo la cuota de mercado con acceso a los eNodeBs de Movistar es del 35% [27], reduce el posible número de UEs a 73 o 1214.

Teniendo en cuenta el resto de suposiciones, que se han empleado en el caso del otro eNodeB para estimar el número aproximado de UEs, como la cuota de Smartphones en España es un 71% (52 o 862 UEs) [28], el tráfico de la red LTE es un 60% (31 o 517 UEs) y que puede haber otros dispositivos haciendo uso de la red, transeúntes que se encuentren en la zona, flujo de estudiantes, habitantes fuera de su lugar de residencia, habitantes con dispositivos desconectados o que no empleen el eNodeB, variación de UEs según la hora, etc. Se ha estimado que el número de UEs empleando el eNodeB 71735326 varía entre 50 y 500 UEs.

El resto de datos técnicos del eNodeB como la frecuencia, el ancho de banda, el tipo de entorno, el número máximo de UEs capaz de soportar, localización exacta, etc, se pueden ver en el cuadro de datos de esta página junto con una fotografía del eNodeB 71735326 analizado.

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

eNodeB 71735326									
UE	Posición UE (coordenadas)	Distancia UE eNodeB (m)	Fecha y hora	Canal	Entorno	Vel. UE (km/h)	Nivel de señal (dBm)	Eficiencia (Mb/s)	Latencia (ms)
1	40° 27' 10" N 3° 43' 41" O	249,06	15/10/16 18:14	Ped	Ext.	0	-92	36,4	31
2	40° 27' 3" N 3° 43' 40" O	228,45	15/10/16 18:26	Ped	Ext.	0	-95	64,56	25
3	40° 26' 59" N 3° 43' 37" O	273,68	15/10/16 18:39	Ped	Ext.	5	-108	28,88	86
4	40° 27' 0" N 3° 43' 33" O	215,84	15/10/16 18:45	Ped	Ext.	0	-96	30,03	24
5	40° 27' 9" N 3° 43' 47" O	361,77	15/10/16 19:55	Ped	Ext.	0	-90	39,49	39
6	40° 26' 54" N 3° 43' 43" O	477,15	15/10/16 20:00	Veh	Ext.	50	-96	20,17	49
7	40° 27' 6" N 3° 43' 40" O	187,49	15/10/16 20:04	Veh	Ext.	50	-96	71,89	20
8	40° 26' 58" N 3° 43' 50" O	509,64	17/10/16 11:37	Ped	Ext.	5	-99	10,23	34
9	40° 27' 5" N 3° 43' 48" O	383,45	17/10/16 11:50	Ped	Int.	0	-102	31,70	29
10	40° 27' 4" N 3° 43' 48" O	389,81	17/10/16 11:58	Ped	Int.+	0	-119	3,03	24

Tabla 32. Mediciones reales para eNodeB 7173526

Al igual que antes, se han realizado 10 medidas en 10 localizaciones diferentes siempre comprobando que los UEs están conectados al eNodeB elegido. En la tabla 32 se pueden ver los resultados obtenidos. Los datos mostrados para este entorno suburbano son similares al caso anterior cuando se analizaba un entorno urbano. Las únicas diferencias son el haber tomado todas las medidas en dos franjas horarias, que no se ha podido realizar ninguna medida de un UE desplazándose de forma ligera y que se ha conseguido realizar una medida de un UE a más de 500 metros sin cambiar de eNodeB.

La primera franja horaria representa las medidas de un sábado por la tarde, es decir, cuando no hay estudiantes y el número de UEs es menor. En concreto las medidas se han realizado el 15 de octubre del 2016 entre las 6 y las 8 de la tarde, para los 7 primeros UEs. Los UEs 1, 2, 4 y 5 reflejan medidas de UEs a pie a 0 km/h, a diferentes distancias y con diferentes niveles de señal, sus eficiencias varían entre 30 y 64 Mb/s. El UE 3 refleja medidas a pie, a una velocidad de 5 km/h con una eficiencia de 29 Mb/s. Y los UEs 6 y 7 reflejan medidas en vehículos a una velocidad de 50 km/h, con una eficiencia de 20 a 71 Mb/s. Todas estas medidas han sido tomadas en el exterior.

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

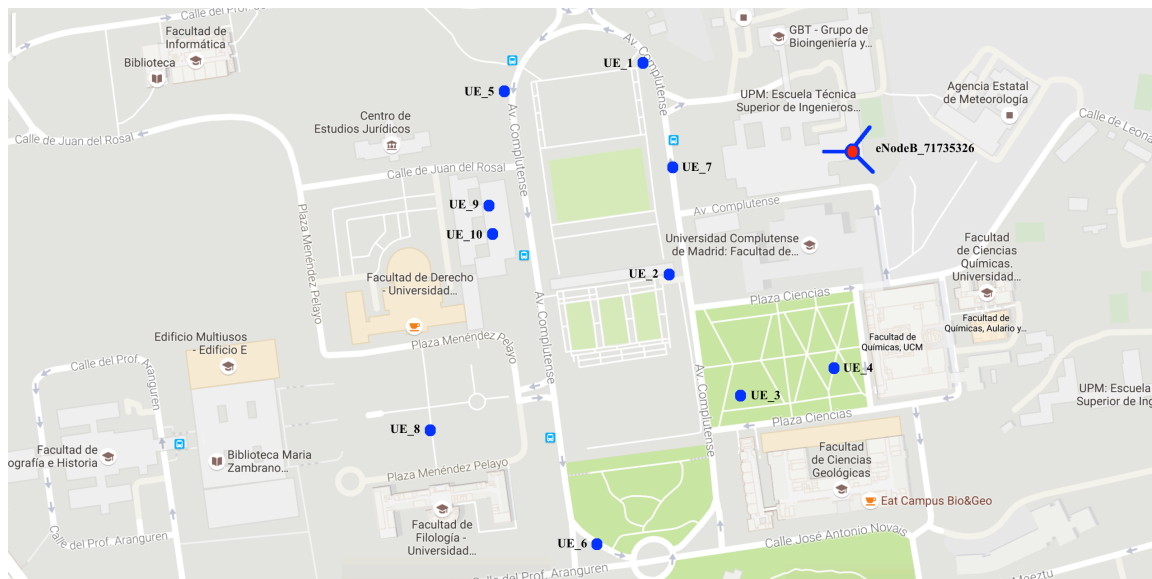


Figura 42. Mapa con posiciones de los UEs y eNodeB 71735326

La segunda franja horaria representa un día con clases en las universidades, con lo cual la afluencia de UEs es mayor, en concreto la mañana del 17 de octubre del 2016. Los UEs 8, 9 y 10 son los que reflejan este horario. El UE 8 a pie, a 5 km/h, obtiene una eficiencia de 10 Mb/s. Los UEs 9 y 10, tomados dentro de la facultad de derecho en la planta 0 y -1 respectivamente, representan entornos con pérdidas de interior y pérdidas de interior profundo obteniendo una eficiencia de 31 y 3 Mb/s.

En la figura 42 se muestra un mapa con todos los UEs y el eNodeB 71735326.

Comparando este eNodeB correspondiente a un entorno suburbano, con los resultados obtenidos en la simulación para *Tri\_sector* y con el eNodeB en un entorno urbano del caso anterior, se obtienen las siguientes conclusiones. Al igual que con dichas configuraciones, al aumentar el número de UEs la eficiencia desciende. Esto se puede ver reflejado perfectamente en los UEs 6 y 8, que se encuentran a una distancia similar del eNodeB, siendo la eficiencia del UE 6 el doble que el del 8, a pesar de ir en vehículo a una velocidad de 50 km/h.

Los modos de transmisión tampoco se pueden comparar esta vez debido que también se desconocen, sólo se sabe que se emplea una configuración MIMO 2x2 y que probablemente sea tipo OLSM o CLSM.

Respecto a las pérdidas por trayecto, al igual que se observaba en la tabla 15 para el modelo *Tri\_sector*, cuando se obtenía una eficiencia ligeramente inferior para modelos suburbanos frente a modelos urbanos, se puede ver que sucede lo mismo en estos dos casos reales, si se observan las tablas 31 y 32. Por ejemplo, si se compara el UE 10 del eNodeB 71698442 con el UE 9 del eNodeB 71735326, ambos en interiores con un nivel de señal similar, se ve como obtienen una eficiencia parecida, aún estando el primero 300 metros más cerca del eNodeB. También se puede apreciar en el UE 4 de de la tabla 31, frente al UE 5 de la tabla 32, que estando a una distancia similar, el UE 4 duplica la

## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES

eficiencia del UE 5. Y así otros ejemplos. Aunque siempre hay que recordar que se puede deber a otros factores y, que se desconocen algunos parámetros de los eNodeBs o del número de UEs.

A continuación se procede a comparar los diferentes canales o como afecta el desvanecimiento de pequeña escala. Como se puede ver en la tabla 32, en el UE 2 tipo pedestre y en el UE 7 tipo vehículo, con una señal y distancia al eNodeB similar, su eficiencia apenas varía, 64 y 71 Mb/s, respectivamente. Es la misma situación que sucedía en el simulador con *Tri\_sector* o en la tabla 31 con el eNodeB 71698442. También se puede ver como el canal no afecta demasiado, si se observan los UEs 4 y 7 con distancias a los eNodeBs similares, nivel de señal parecida, obteniendo peor eficiencia el UE 4 tipo pedestre frente al UE 7 tipo vehículo, aunque se desconoce si se debe al CQI.

El desvanecimiento de gran escala tampoco se pueden comparar debido a que casi siempre hay, a causa de los obstáculos. Sin embargo, si que se pueden observar fácilmente con los UEs 2 y 4, los cuales sólo se encuentran a una distancia prácticamente similar con una diferencia de tan sólo 13 metros, un nivel de señal que sólo varía en 1 dBm, mismas condiciones de canal, entorno y velocidad de los UEs y en cambio el UE 2 tiene un 114% más de eficiencia. Ésto puede deberse a otras causas como el número de UEs en ese instante, tipo de planificador, etc. Pero seguramente se deba al CQI y el desvanecimiento de gran escala.

Finalmente, el tipo de planificador tampoco se sabe ni se puede comparar. Seguramente, como ya se ha mencionado, se emplee *Round Robin*, *Prop Fair*, *Sun*, *Resource Fair* o un planificador similar, con el fin de proporcionar el mejor throughput. O en su defecto, el UE cambie el tipo de cobertura.

# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

### 5.1 Conclusiones

A lo largo de este proyecto se han estudiado las bondades y las posibilidades de un simulador LTE a nivel de sistema basado en MATLAB, así como las comparaciones con el mundo real.

Las principales características a la hora de diseñar una red robusta en LTE que se ha visto que el simulador a nivel de sistema permite estudiar son los modos de transmisión, las pérdidas por trayecto debidas al entorno, el desvanecimiento de pequeña escala, el desvanecimiento de gran escala y los tipos de planificadores.

Se ha constatado la importancia de los modos de transmisión. Aunque en este proyecto, no se han podido estudiar todos los modos de transmisión debido a que se ha empleado la versión pública del simulador. Efectivamente se ha visto la importancia que tiene el variar los modos de transmisión, así como las posibles combinaciones de antenas de transmisión y recepción. También, se ha visto como el uso de sistemas MIMO con mayor número de antenas, son los que proporcionan la mayor eficiencia posible.

Se ha expuesto la importancia del resto de características. Cómo afecta la distancia a las pérdidas por trayecto y los diferentes tipos de entorno. Qué influye más la saturación de un eNodeB o las pérdidas en interior de los UEs, que la distancia al eNodeB. Que el desvanecimiento de pequeña escala, es decir, el canal empleado y la velocidad a la que se desplazan los UEs sí afecta, pero que las eficiencias de los UEs no varían tanto si se encuentran en un punto cercano al eNodeB. Que el desvanecimiento de gran escala debido a los diferentes obstáculos sí son un gran inconveniente, pero que a veces se pueden conseguir mejores eficiencias en posiciones más alejadas debido a ellos y a la calidad del canal. Y que el tipo de planificador empleado determina la eficiencia recibida.

Con los resultados obtenidos se ha llegado a la conclusión de que a la hora de obtener la mayor eficiencia posible en un UE empleando LTE, lo que más afecta y por

este orden son, la cantidad de UEs utilizando un eNodeB, las antenas y modos de transmisión empleados, la calidad del canal y las pérdidas por trayecto.

A través de las pruebas realizadas en los dos eNodeBs reales en un entorno urbano y uno suburbano se ha visto que los resultados obtenidos en el simulador son coherentes y acordes a la realidad.

Asimismo, se ha visto cómo las redes LTE comercialmente denominadas 4G, a fecha de hoy 2016, aún no han llegado a su máxima expansión. Estando éstas sólo disponibles en núcleos urbanos y todavía no proporcionando los máximas eficiencias posibles. Además de que la siguiente generación LTE Advanced o 4G+ aún sólo está disponible para unas pocas poblaciones, con lo cual se concluye que éste y otros simuladores de LTE siguen teniendo una gran importancia.

## 5.2 Líneas futuras

Actualmente ya existe una versión actualizada a nivel de sistema del simulador compatible con LTE Advanced y desarrollada por la universidad de Viena. Sin embargo, esta versión está en continua expansión introduciendo constantes novedades, solucionando pequeños fallos y actualizándose acorde con las revisiones de la ITU.

Sería interesante en un futuro introducir al simulador la capacidad de poder exportar los datos de las interfaces de una manera más visual, fácil de almacenar, más legible y con capacidad de poder ser manipulados dichos datos en otros programas como hojas de cálculo.

También, sería útil actualizar el simulador introduciendo un Script global con todas las opciones y simulaciones ya integradas en él, de forma clara y concisa. De tal forma que el usuario sólo tuviera que modificar ese script y no las otras clases del simulador a la hora de escoger cualquier tipo de opción.

Otra posible línea futura, sería actualizar el simulador introduciendo una simulación en la cual se pudieran añadir las coordenadas y distancias de los eNodeBs, así como de los UEs, además de poder introducir objetos con el fin de ajustar el desvanecimiento de gran escala y el índice de calidad del canal, CQI, para luego poder comparar los resultados mejor con la realidad.



# Presupuesto



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
Escuela Politécnica Superior

## PRESUPUESTO DE PROYECTO

### 1.- Autor

David Ladera Iñiguez

### 2.- Departamento

Teoría de la Señal y Comunicaciones

### 3.- Descripción del Proyecto

- Título: Planificación de una Red LTE mediante Simulador en Matlab  
- Duración (meses): 12  
Tasa de costes Indirectos: 20%

### 4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

31.180,00 Euros

### 5.- Desglose presupuestario (costes directos)

#### PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Ana García Armada		Ingeniero Senior	0,8	4.289,54	3.431,63	
David Ladera Iñiguez		Ingeniero	8	2.694,39	21.555,12	
<b>Hombres mes 8,8</b>				<b>Total</b>	<b>24.986,75</b>	

<sup>a)</sup> 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)  
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

#### EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
Macbook Pro Retina	1.649,00	100	12	60	329,80
Iphone 6 Plus	899	20	12	36	59,93
Disco Duro (Backup)	79,00	100	12	12	79,00
SAI 900VA	53,00	100	12	36	17,67
Resto Material	100,00	100	12	12	100,00
<b>Total</b>					<b>586,40</b>

<sup>d)</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = n° de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado  
B = periodo de depreciación (60 meses)  
C = coste del equipo (sin IVA)  
D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

#### SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Almacenamiento Online	Dropbox	99,00
<b>Total</b>		<b>99,00</b>

#### OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO<sup>e)</sup>

Descripción	Empresa	Costes imputable
Licencia Matlab		500,00
Gasto Energético		120,00
<b>Total</b>		<b>620,00</b>

<sup>e)</sup> Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

### 6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	24.987
Amortización	586
Subcontratación de tareas	99
Costes de funcionamiento	620
Costes Indirectos	5.258
<b>Total</b>	<b>31.551</b>



# Apéndice

En este apartado se pretende mostrar una pequeña guía de iniciación de como instalar el simulador (LTE-A Downlink System-Level Simulator). Así como los componentes extras necesarios y las configuraciones a llevar a cabo antes de que sea funcional.

## Requisitos

El primer paso será comprobar los requisitos, estos son aproximados y en base a las necesidades de la ejecución de las funciones más exigentes.

- PC o MAC.
- Procesador Intel Core I3 o superior, 4GB de Ram o superior.
- Linux, OSX o Windows.
- Matlab R2009a (se recomienda usar versión 2014 o posterior debido al uso de algunas funciones sólo disponibles a partir de estas versiones).
- Statistics Toolbox

## Instalación

Lo primero es acceder a la página principal del simulador.

<https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vienna-lte-a-simulators/>

En dicha web se puede encontrar el enlace con la última versión del simulador disponible. Actualmente, la última versión es la 1.9. Para poder acceder a ella, es necesario contar con una licencia o solicitar una, escribiendo a Martin Taranetz al siguiente correo electrónico [martin.taranetz@nt.tuwien.ac.at](mailto:martin.taranetz@nt.tuwien.ac.at) junto con el acuerdo de licencia firmado. Dicha licencia sólo será concedida a departamentos de universidades.

En caso de no contar con una licencia, habrá que descargarse la versión “legacy”. Es una versión anterior, concretamente la versión 1.6. Se encuentra disponible en el siguiente enlace bajo el nombre LTE-A Downlink System-Level Simulator v1.6.

<https://www.nt.tuwien.ac.at/downloads/>

Una vez descargado el simulador no requiere ningún tipo de instalación, ya que son archivos de Matlab. Se puede emplear el simulador desde la propia carpeta donde se encuentra.

Para que se puedan emplear todas las características del simulador se necesitan descargar los siguientes extras. Posteriormente copiar y pegar los archivos dentro de las carpetas correspondientes.

Archivos - Winner +

Donde - [http://projects.celtic-initiative.org/winner+/phase\\_2\\_model.html](http://projects.celtic-initiative.org/winner+/phase_2_model.html)

Carpeta - Winner Channel Model

Archivos - CVX (Escoger versión estándar)

Donde - <http://cvxr.com/cvx/doc/install.html>

Carpeta - cvx

Es probable, que se necesite realizar un último cambio para que se vean correctamente las interfaces principales al ejecutar el programa. Para ello, desde MATLAB y una vez dentro de la carpeta principal del programa, hay que modificar las siguientes figuras:

LTE\_GUI\_show\_aggregate\_results.fig

LTE\_GUI\_show\_UEs\_and\_cells.fig

Modificar ambas figuras de la misma manera siguiendo estos pasos en orden:

Botón derecho del ratón sobre la figura > Seleccionar “Open in GUIDE” > Abrir pestaña “Tools” > Seleccionar “GUI options” > Cambiar la opción “Resize Behaviour” > Escoger “Proportional” en vez de “Non-resizable” > Guardar cambios

Una vez realizados todos estos cambios, ya se puede proceder a emplear el simulador.

## **Ejecución**

Se aconseja la lectura de la guía “LTEsystemDoc.pdf” incluida en la carpeta “documentation” para entender todos los parámetros modificables del simulador, antes de llevar a cabo la primera simulación.

Para ejecutar el simulador sólo hay emplear cualquier archivo que contenga ejemplos, el simulador incluye uno llamado “LTE\_sim\_main\_launcher\_examples.m”. Hay que ejecutarlo desde el “Command Window”.

# Glosario

2G	<i>2nd Generation</i>
3G	<i>3rd Generation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>4th Generation</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CQI	<i>Channel Quality Indication</i>
DoA	<i>Dead on Arrival</i>
ECDF	<i>Empirical Cumulative Distribution Function</i>
ECR	<i>Effective Code Rate</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
eNodeB o eNB	<i>Envolved Node B</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSPA+	<i>Evolved High Speed Packet Access</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MCC	<i>Mobile Country Code</i>
MCS	<i>Modulation and Code Scheme</i>
MNC	<i>Mobile Network Code</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>

NACK	<i>Negative Acknowledgement</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
RB	<i>Resource Block</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

# Referencias

[1] Statista. (2016). “Mobile phone internet user penetration worldwide from 2014 to 2019” en *Statista*. [En línea]. Disponible en: <http://www.statista.com/statistics/284202/mobile-phone-internet-user-penetration-worldwide/> [Accesado en abril del 2016]

[2] Statista. (2016). “Global mobile data traffic from 2015 to 2020 (in exabytes per month)” en *Statista*. [En línea]. Disponible en: <http://www.statista.com/statistics/271405/global-mobile-data-traffic-forecast/> [Accesado en abril del 2016]

[3] World Bank Group. (2016). “World Development Indicators 2016” en *World Bank*. [En línea]. Disponible en: <http://databank.worldbank.org/data/download/site-content/wdi-2016-highlights-featuring-sdgs-booklet.pdf> [Accesado en abril del 2016]

[4] Seisa, S.; Toufik, I (ed.). y M. Baker (ed.). (2009). *LTE The UMTS Long Term Evolution*. 2a edición. Reino Unido: Wiley.

[5] Harte, L.; Bomley, B. y M. Davis. (2008). *Introduction to GSM Physical Channels, Logical Channels, Network Functions, and Operation*. Estados Unidos: Phoenix Global Support.

[6] Myung, H. G. y D. J. Goodman. (2008). *Single Carrier FDMA, New Air Interface for LTE*. Reino Unido: Wiley.

[7] Rekhi, P. K.; Luthra, M.; Malik, S. y R. Atri. (2012). “Throughput Calculation for LTE TDD and FDD Systems” en *Slideshare*. [En línea]. Disponible en <http://es.slideshare.net/veermalik121/throughput-calculation-for-lte-tdd-and-fdd-system> [Accesado en abril del 2016]

[8] OpenSignal. (2016). “The State of LTE” en *OpenSignal*. [En línea]. Disponible en: <http://opensignal.com/reports/2016/02/state-of-lte-q4-2015/> [Accesado en junio del 2016]

[9] Poole, I. (2016). “LTE OFDM, OFDMA, SC-FDMA & Modulation” en *Resources and analysis for electronics engineers*. [En línea]. Disponible en <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/lte-long-term-evolution/lte-ofdm-ofdma-scdma.php> [Accesado en junio del 2016]

[10] Cabrejas Peñuelas, J.; Olmos Bonafé, J. J.; García Lozano M. y A. Fernández Aguilera. (2011). *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*. España: MARCOMBO.

[11] Zyren, J., (2007) "Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer" en *freescale semiconductor*.

- [12] Anritsu Company. (2015). "LTE Resource Guide" en *Universidad de Columbia*. [En línea]. Disponible en: <http://www.cs.columbia.edu/6181/hw/anritsu.pdf> [Accesado en junio del 2016]
- [13] Zhang, X. y X. Zhou. (2012). *Lte-Advanced Air Interface Technology*. Reino Unido: CRC Press.
- [14] Schulz, B., (2015) "LTE Transmission Modes and Beamforming" en *Rohde&Schwarz*.
- [15] Khilifi, A. y R. Bouallege. (2011). "Performance Analysis of LS and LMMSE Channel Estimation Techniques for LTE Downlink Systems" en arxiv. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/1111.1666.pdf> [Accesado en junio del 2016]
- [16] Colom Ikuno, J. y M. Taranetz. (2012). "Vienna LTE Simulators System Level Simulator Documentation, v1.6r885" en *instituto de telecomunicaciones de la universidad de Viena*.
- [17] Schwarz, S.; Mehlführer, C. y M. Rupp. (2010). "Low Complexity Approximate Maximum Throughput Scheduling for LTE" en *publicaciones de la universidad de Viena*.
- [18] Kushner, H. J. y Whiting, P.A. (July 2014). "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions" en *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- [19] Ajmone, M.; Bianco, A.; Giaccone, P.; Leonardi, E. y F. Nere. (2003). "Multicast Traffic in Input-Queued Switches: Optimal Scheduling and Maximum Throughput" en *IEEE*.
- [20] Kanagasabai, Aswin y Nayak, Amiya. (2015). "Channel Aware Scheduling Algorithm for LTE Uplink and Downlink" en *Macrothink*. [En línea]. Disponible en: <http://www.macrothink.org/journal/index.php/npa/article/download/8229/7016> [Accesado en julio del 2016]
- [21] Mehlführer, C.; Colom Ikuno, J.; Šimko, M.; Schwarz, S.; Wrulich, M. y M. Rupp. (2011). "The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research" en *EURASIP Journal*.
- [22] Ifixit. (2014). "Iphone 6 Plus Teardown" en Ifixit. [En línea]. Disponible en: <https://www.ifixit.com/Teardown/iPhone+6+Plus+Teardown/29206> [Accesado en octubre del 2016]
- [23] Qualcomm. (2011). "Qualcom Delivers a Faster Mobile Broadband Experience with New, Higher Speed LTE Devices" en *Qualcomm*. [En línea]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2011/02/14/qualcomm-delivers-faster-mobile-broadband-experience-new-higher-speed-lte> [Accesado en octubre del 2016]
- [24] Klug, B. (2013). "The State of Qualcomm's Modems - WTR1605 and MDM9x25" en Anandtech. [En línea]. Disponible en: <http://www.anandtech.com/show/6541/the-state-of-qualcomms-modems-wtr1605-and-mdm9x25/3> [Accesado en octubre del 2016]
- [25] Huawei Technologies Co., Ltd. (2013). "eLTE3.1 DBS3900 LTE FDD Product Description" en *Huawei*. China.



[26] Área de Gobierno de Economía, Hacienda. (2016). “Datos geográficos y administrativos” en *Padrón Municipal de Habitantes*. [En línea]. Disponible en: <http://www-2.munimadrid.es/CSE6/control/seleccionDatos?numSerie=14010100010> [Accesado en octubre del 2016]

[27] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. (2016). “Líneas de telefonía móvil de voz por tipo de contrato y por segmento” en *CNMC*. [En línea]. Disponible en: [http://data.cnmc.es/datagraph/jsp/inf\\_anual.jsp](http://data.cnmc.es/datagraph/jsp/inf_anual.jsp) [Accesado en octubre del 2016]

[28] Pew Research Center. (2016). “Smartphone Ownership and Internet Usage Continues to Climb in Emerging Economies” en *PRC*. <http://www.pewglobal.org/2016/02/22/smartphone-ownership-and-internet-usage-continues-to-climb-in-emerging-economies/> [Accesado en octubre del 2016]