

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE
RECURSOS RADIO EN REDES 5G**
(Radio resource management optimization in
5G networks)

Para acceder al Título de

***Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación***

Autor: Paula Rodríguez Fernández

OCTUBRE - 2017



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

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Realizado por: Paula Rodríguez Fernández

Director del TFM: Ramón Agüero Calvo

Título: “ Optimización de la gestión de recursos radio en redes 5G”

Title: “ Radio resource management optimization in 5G networks ”

Presentado a examen el día: 30 de Octubre de 2017

para acceder al Título de

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Luis Muñoz Gutiérrez

Secretario (Apellidos, Nombre): Ramón Agüero Calvo

Vocal (Apellidos, Nombre): Roberto Sanz Gil

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster Nº
(a asignar por Secretaría)

Resumen

La continua evolución de las comunicaciones inalámbricas supone un reto constante en el ámbito tecnológico para garantizar a los usuarios una mínima calidad de servicio acorde con la tasa de datos que se requiere. Surgiendo por ello, un creciente número de técnicas y conceptos con el objetivo de ofrecer mejores prestaciones.

Una de las soluciones planteadas por los operadores para mejorar la cobertura celular, es el despliegue de redes heterogéneas (HetNet) mediante la integración de small-cells en redes tradicionales de macro-cells. Para sacar el máximo rendimiento y eficiencia a este nuevo concepto de red, propuesto en las estandarizaciones de LTE-Advanced, se plantean diversas técnicas de selección de acceso, como CRE o DUDe.

Atendiendo a lo anterior, el objetivo de este trabajo es la elaboración de una herramienta de simulación basada en un entorno *C++*, a partir de la cual, se modelará el comportamiento de dichas técnicas en diferentes escenarios LTE, con el fin de estudiar de forma cualitativa los posibles beneficios que éstas conllevan. A lo largo del trabajo se analizarán diversas métricas, como los servicios cursados o la eficiencia de las soluciones analizadas y se describirán los resultados obtenidos.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estructura de la memoria	2
2. Long Term Evolution	4
2.1. Introducción	4
2.1.1. Evolución de los sistemas móviles	5
2.1.2. Actualidad y futuro	7
2.2. Características LTE	8
2.2.1. Tasa de datos	8
2.2.2. Esquema de transmisión	10
2.2.3. Sectorización	15
2.2.4. Modelos de propagación	16
2.2.5. Redes heterogéneas	19
2.3. Técnicas de acceso	21
2.3.1. RSRP	22
2.3.2. CRE	23
2.3.3. DUDe	24
3. Entorno de simulación	28
3.1. Características generales	30
3.1.1. Elementos de simulación	30
3.1.2. Metodología de la simulación	32
3.1.3. Ejemplo	32
3.2. Caracterización de la herramienta	34
3.2.1. Acciones	38
4. Análisis de resultados	47
4.1. Validación de la implementación	47
4.2. Análisis del modelo de interferencia	52

4.3. Análisis del comportamiento de los servicios	58
5. Conclusiones	62
Appendices	64
A. PDF Interferencia mutua	65
Bibliografía	65

Índice de figuras

2.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles . . .	7
2.2. Propagación multicamino	10
2.3. Transmisión Multiportadora	11
2.4. Espectro de una subportadora ODFM y de una señal OFDM	12
2.5. Recursos físicos LTE en tiempo y frecuencia [5]	12
2.6. Esquema multiplexación de usuarios de LTE	13
2.7. Esquema OFDMA de LTE	13
2.8. Diferenciación en la modulación para enlace de subida y de bajada	14
2.9. Área cubierta con círculos	15
2.10. Área cubierta con hexágonos	15
2.11. Representación puntos PL_{UL} y SS_{DL} en una red hete- rogénea	21
3.1. Modelo de instanciación de GWNSyM	31
3.2. Configuración AEs y Celdas	35
3.3. Configuración Usuarios, UEs y Servicios	35
3.4. Diagrama de estados	36
3.5. Esquema del simulador empleado	38
3.6. Escenario con dos usuarios interferentes	46
4.1. Escenario desplegado para validación de la herramienta .	48
4.2. Potencia media de transmisión en el enlace ascendente a diferentes distancias de las estaciones base. La superficie sombreada delimita los percentiles del 10 y 90 %	49
4.3. Potencia media de transmisión ante diferente número de small-cells desplegadas	51
4.4. Probabilidad media de asociación con la macro-cell. El eje de abscisas indica el número de small-cells desplegadas .	51
4.5. PDF de la transmisión de potencia usando modelo de interferencia mutua	54

4.6. PDF de la interferencia usando modelo de interferencia mutua para DUDe	56
4.7. PDF de la transmisión de potencia usando modelo de interferencia constante	57
4.8. Número de traspasos por servicio	59
4.9. Estadísticas de servicios	60
A.1. PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (RSRP)	65
A.2. PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE1)	66
A.3. PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE2)	66
A.4. PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE3)	66

Capítulo 1

Introducción

Las comunicaciones móviles se caracterizan por estar en continua evolución, apareciendo nuevas tecnologías con el fin de garantizar a los usuarios una mínima calidad de servicio, acorde a la tasa de datos que se requiere. Debido a esta continua mejora, surge en la sociedad actual, una gran dependencia de estas comunicaciones, lo que se traduce en un gran auge de las redes de datos (sobre todo con la aparición de los smartphones, tablets y notebooks) y la necesidad de más recursos.

Los operadores han aumentando la capacidad usando nuevas zonas del espectro radioeléctrico, añadido técnicas de antenas múltiples, y aplicando esquemas de modulación y codificación más eficaces. Sin embargo, con el fin de superar el desafío que supone el aumento de tráfico y usuarios de la red, las redes celulares están pasando de un enfoque de red homogéneo, con un solo nivel, a redes heterogéneas con varios niveles (HetNets). HetNets, compuestas por diferentes tipos de small-cells (micro, pico y femto) y macro células, surgen en los últimos años como una forma eficiente y escalable de mejorar la capacidad de la red en puntos de acceso, y manteniendo el rendimiento y calidad de los servicios. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de red, como 3G o 4G, fueron diseñadas pensando en células Macro.

Debido a este cambio en la estructura de las redes celulares, es necesaria una nueva perspectiva en su implementación, planteando cambios y mejoras fundamentales que se deben hacer para que las redes futuras funcionen de manera eficiente. De esta forma, surgen, en las redes 4G, el empleo de técnicas como CRE (Cell Range Expansion) y DUDe (Downlink/Uplink decoupling), frente a selecciones de acceso más tradicionales

como RSRP (Reference Signal Received Power).

Durante el desarrollo de esta memoria, tras una breve introducción a LTE, se explicarán los conceptos básicos y el funcionamiento de las técnicas de acceso RSRP, CRE y DUDe, para realizar posteriormente, un análisis sobre redes celulares heterogéneas, con el uso de estas estrategias de selección de acceso. Se definirá también, el entorno de simulación GWNSyM, creado por el Grupo de Ingeniería Telemática, empleado en la implementación y obtención de los resultados de este trabajo.

1.1. Objetivos

Este trabajo plantea como objetivos principales los que se exponen a continuación:

- Una adaptación de la herramienta de simulación GWNSyM, al entorno necesario para el desarrollo de este trabajo.
- Planteamiento y resolución de problemas, en términos de técnicas RSRP, CRE y DUDe
- Un estudio de los posibles beneficios de estas técnicas, en cuanto a energía y servicios, analizando diferentes escenarios de trabajo en redes heterogéneas en igualdad de condiciones.

1.2. Estructura de la memoria

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

- Capítulo 1: Introducción
Se ha realizado una introducción del tema sobre el que se articula este proyecto, estableciendo las metas a alcanzar y las motivaciones de las que se parten.
- Capítulo 2: Long Term Evolution
Se realizará una breve descripción de la evolución de las comunicaciones móviles, desde su comienzo hasta el día de hoy con la

llegada de LTE. Además, se explicarán sus características principales, así como las de las diferentes técnicas de selección de acceso abordadas en la realización de este trabajo.

- Capítulo 3: Entorno de simulación

Se explicará el modelado y funcionamiento de la herramienta empleada en la elaboración del trabajo, haciendo una descripción detallada de cada uno de sus componentes.

- Capítulo 4: Análisis de resultados

Se describirán las diferentes fases realizadas a lo largo del trabajo, analizando los escenarios planteados, así como los resultados obtenidos en cada una de ellas.

- Capítulo 5: Conclusiones

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

Capítulo 2

Long Term Evolution

En este capítulo va a realizarse una breve introducción a la tecnología LTE (Long Term Evolution) y LTE-A (Long Term Evolution Advanced), comentando su aparición en el mundo de los sistemas móviles y su evolución, así como algunas de sus características más relevantes, necesarias para abordar las técnicas empleadas en este trabajo: RSRP, CRE y DUDe, que también serán explicadas a lo largo del capítulo, con el fin de comprender de manera más clara el objetivo y desarrollo de este proyecto.

2.1. Introducción

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

LTE y LTE-Advanced han transpasado el “límite generacional”, con su capacidad para datos de alta velocidad, eficiencias espectrales significativas y la adopción de técnicas de radio avanzadas. Así, su aparición ha supuesto la base de todos los nuevos sistemas móviles.

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

2.1.1. Evolución de los sistemas móviles

Las comunicaciones móviles han pasado de ser una tecnología al alcance de unos pocos, a ser empleadas por un gran porcentaje de la población mundial.

Esta tecnología se encuentra en constante evolución. Desde los primeros experimentos de Guglielmo Marconi a finales del siglo XIX, hasta el día de hoy, el mundo de las comunicaciones móviles ha experimentado un avance significativo, pasando por diferentes niveles, desde la primera generación (1G), hasta la cuarta (4G), con perspectivas de llegar a la 5G hacia el 2020.

La Primera Generación de las redes móviles apareció en la década de los 80s. Estos sistemas, conocidos como redes celulares debido a su estructura (una malla de células que abarcan diferentes áreas de cobertura, disponiendo cada una de ellas de una estación base), se basaban en transmisiones analógicas. Algunos de los estándares más populares desplegados para esta tecnología fueron: *Advance Mobile Phone System (AMPS)*, en América, *Total Access Communication Systems (TACS)*, en Europa, *Japan Total Access Communications System (J-TACS)*, en Japón y *Nordic Mobile Telephone (NMT)*, en los países Nórdicos. Se trata de un sistema únicamente para voz, caracterizado por una baja calidad de enlace, capacidad y velocidad. Con la aparición de la red 1G, el mercado global de telefonía móvil creció del 30 % a 50 % en un año, alcanzando en 1990, un total de 20 millones de suscriptores.

A principios de los noventa, apareció la segunda generación (2G), empleando estándares como *Global System for Mobile communications (GSM)* y *Personal Digital Cellular (PDC)*, basados en técnicas TDMA (Time- Division Multiple Access). Este sistema utilizaba la modulación digital, lo cual mejoraba notablemente la calidad del mismo. Sin embargo, el servicio de datos ofrecido era limitado, ofreciendo servicios de fax, mensajes de texto y correo de voz.

A finales de los años 90, se introdujo una fase intermedia, conocida como 2.5G. A esta generación pertenece el estándar *General Packet Radio System (GPRS)*, capaz de transmitir datos empleando conmutación de paquetes sobre las redes GSM existentes. De esta manera, se permite

a los usuarios enviar datos a una mayor velocidad, el intercambio de imágenes y la posibilidad de navegar por internet.

La revolución 3G o tercera generación, permitió a los usuarios de teléfonos móviles utilizar aplicaciones de audio, gráficos y video, empleando la conmutación de paquetes para la transmisión de datos y soportando velocidades de hasta $2Mbps$ en las mejores condiciones. Sin embargo, estas aplicaciones pueden verse limitadas por los cuellos de botella de la red y el exceso de uso. El sistema 3G predominante a nivel mundial es *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), desarrollado como el sustituto de GSM por el grupo de trabajo 3GPP. Uno de los principales objetivos detrás de 3G era estandarizar un único protocolo de red global en lugar de los diferentes estándares adoptados previamente en Europa, los Estados Unidos y otras regiones.

En consecuencia, la industria comenzó a buscar tecnologías optimizadas de datos de cuarta generación, con la promesa de mejoras de velocidad de hasta 10 veces superiores a las tecnologías 3G existentes. Así en 2004, el grupo 3GPP comenzó a estudiar la evolución de la red 3G a la cuarta generación.

El enlace está marcado por la tecnología LTE, precursora de las redes 4G. Las especificaciones del interfaz radio LTE y las de su capa física, se aprobaron en 2007 y 2008, respectivamente, pudiéndose considerar que LTE es una tecnología plenamente operativa desde diciembre de 2009. Sus principales objetivos eran alcanzar elevadas eficiencias espectrales ($5bits/s/Hz$ en el enlace descendente, y la mitad en el ascendente) y flexibilidad en la asignación de frecuencias; además se fijaron $100Mbps$ para el enlace descendente, $50Mbps$ para el ascendente y $20MHz$ de ancho de banda [2].

Debido al rápido desarrollo de las tecnologías inalámbricas y a la convergencia de las normas, se espera, a medio plazo, la aparición de la quinta generación (5G), proporcionando una mayor capacidad para satisfacer la demanda de los usuarios. Las características de esta tecnología aún no están fijadas, pero se prevé que se proporcione un caudal uniforme de al menos $1Gbit/s$, con un máximo cercano a los $10Gbit/s$ y un par de milisegundos de latencia. Se espera además, que las distintas tecnologías

se complementen entre sí para alcanzar el objetivo común de proporcionar un servicio ubicuo, a través de las redes móviles [3].



Figura 2.1: Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles

2.1.2. Actualidad y futuro

En la actualidad, la tecnología LTE se encuentra integrada en el mercado, y es una de las más empleada por los usuarios móviles alrededor del mundo.

La primera versión estandarizada para 3GPP LTE, es decir, la Release-8, se completó en diciembre de 2008. Desde entonces, se han aprobado numerosas versiones durante los años posteriores. En el 2011, el 3GPP lanzó el release 10, conocido como LTE Advanced (LTE-A), que incorpora una serie de mejoras, en la eficiencia espectral y la experiencia final del usuario. Se encuentran, por ejemplo, las configuraciones multiantena MIMO o las técnicas CRE, una de las estudiadas en este trabajo y que se explicarán más en detalle en el apartado 2.3.2 [1].

En la actualidad, se ha publicado hasta la release 14 y desde el segundo semestre del 2017, el enfoque de trabajo del 3GPP ha pasado a ser la versión 15, para entregar el primer conjunto de estándares 5G, incluyendo nuevos trabajos y la maduración de las especificaciones LTE-Advanced Pro.

Mientras que el 5G integrará los avances tecnológicos más recientes para lograr el mejor rendimiento posible, se espera que LTE-Advanced continúe evolucionando, como parte de las tecnologías 5G, de una manera compatible hacia atrás, para maximizar el beneficio de las masivas economías de escala, establecidas en el ecosistema LTE / LTE-Advanced.

En términos de mercado, la industria móvil está dirigiendo su atención a las redes 5G, pero según el último análisis de OpenSignal de rendimiento global LTE (junio de 2017 [4]), todavía hay bastante actividad alrededor del 4G, en la actualidad más de 75 países cuentan con servicios LTE. Desde que se desplegó el primer servicio público de LTE en las ciudades escandinavas de Estocolmo y Oslo, en diciembre del 2009, las redes móviles de cuarta generación no han parado de expandirse. Según estimaciones de Ovum² y 5G Americas³, al concluir el 2017 se proyecta que las conexiones LTE alcancen los 2,500 millones de suscripciones; 3,000 millones en el 2018 y 4,200 millones de conexiones para el año 2020.

2.2. Características LTE

Una vez comentado el inicio y la evolución hasta la situación actual de las redes LTE, se pasa a abordar algunos de los aspectos más importantes que caracterizan esta tecnología, como son su modelo de propagación o su esquema de transmisión, tanto en el enlace ascendente (uplink, UL), como en el descendente (downlink, DL), ambas direcciones analizadas en este trabajo.

2.2.1. Tasa de datos

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

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

Analizando la ecuación 2.1, se observa la complejidad a la hora de definir una expresión general, para determinar la máxima tasa de datos de un canal de comunicación. Sin embargo, con el fin de estudiar las diferentes maneras de aumentar dicha tasa, se puede analizar un caso

²Firma independiente de analistas y consultores con sede en Londres, especializada en cobertura global de IT y de las industrias de telecomunicaciones.

³Organización sin fines de lucro, compuesta por proveedores de servicios y fabricantes líderes de la industria de las telecomunicaciones, que tiene como misión promover y abogar por el avance y las capacidades plenas de la tecnología móvil LTE y su evolución más allá de las 5G a lo largo de las redes, servicios, aplicaciones y dispositivos conectados de manera inalámbrica en el ecosistema de las Américas.

particular, en el que el canal sólo se ve afectado por el ruido blanco gaussiano (AWGN), por lo que la capacidad C puede definirse mediante la siguiente ecuación 2.2.

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

Siendo:

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

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

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

Estas posibles soluciones sirven, en escenarios limitados por interferencia o por ruido. Sin embargo, hay que tener en cuenta la diferencia entre estos dos factores, y es que la interferencia tiene una estructura que la vuelve predecible, al contrario del ruido [5].

2.2.2. Esquema de transmisión

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

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

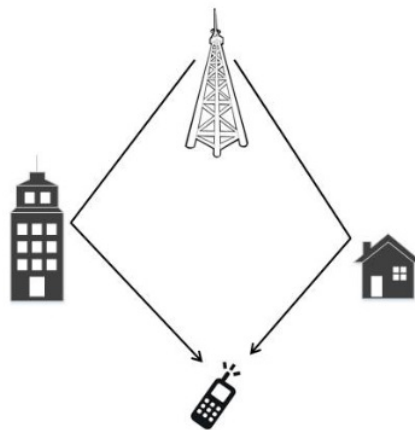


Figura 2.2: Propagación multicamino

Estos desvanecimientos dependen principalmente de dos factores:

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

Transmisión en el DL

De este modo, para poder aumentar el ancho de banda de transmisión, sin perjudicar a la señal debido a los desvanecimientos, se hace uso en el enlace descendente de la Transmisión Multiportadora, que propone la transmisión de múltiples señales de banda estrecha, normalmente llamadas

subportadoras, multiplexadas en frecuencia y transmitidas hacia el mismo receptor, sobre un mismo enlace radio, como se puede observar en la Figura 2.3.

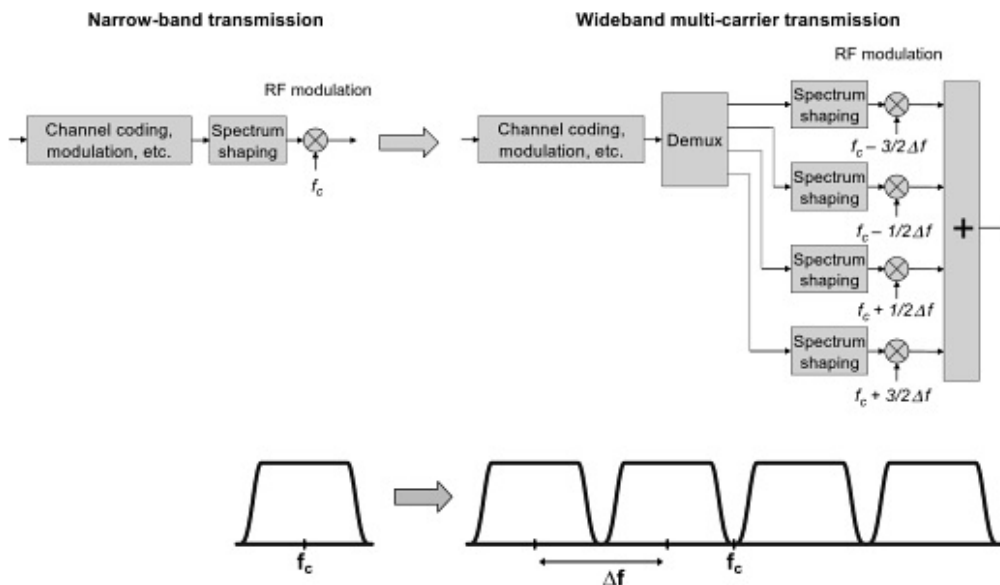


Figura 2.3: Transmisión Multiportadora

Mientras una simple transmisión multiportadora contiene unas pocas subportadoras, en OFDM se transmite un gran número de ellas. De esta manera se consigue una alta robustez frente a canales selectivos, haciendo que el tiempo de símbolo sea mayor que el retardo de propagación de canal, reduciendo así, o incluso eliminando, la interferencia entre símbolos. Esto es posible gracias a la introducción de un prefijo cíclico (CP), copia de la última parte del símbolo OFDM anterior. Además, permite una implementación de baja complejidad, a través del uso de la transformada rápida de Fourier (FFT), ofreciendo flexibilidad de espectro, lo que facilita una evolución sencilla de las tecnologías de acceso de radio ya existentes, hacia LTE.

En OFDM, cada subportadora es ortogonal al resto. Esto se consigue haciendo coincidir el máximo de amplitud del espectro de una subportadora, con los ceros de las otras, evitando así la interferencia entre ellas, como se muestra en la Figura 2.4 [12].

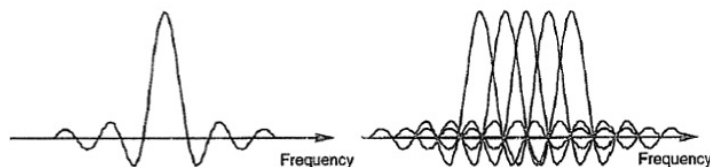


Figura 2.4: Espectro de una subportadora OFDM y de una señal OFDM

Un resource element puede definirse como una subportadora durante un símbolo OFDM, y se agrupan en resource blocks, como se muestra en la Figura 2.5. Cada uno está formado por 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia, con una duración de 0.5 ms por ranura en el dominio del tiempo. De esta forma, cada resource block contiene $7 \cdot 12 = 84$ resource elements.

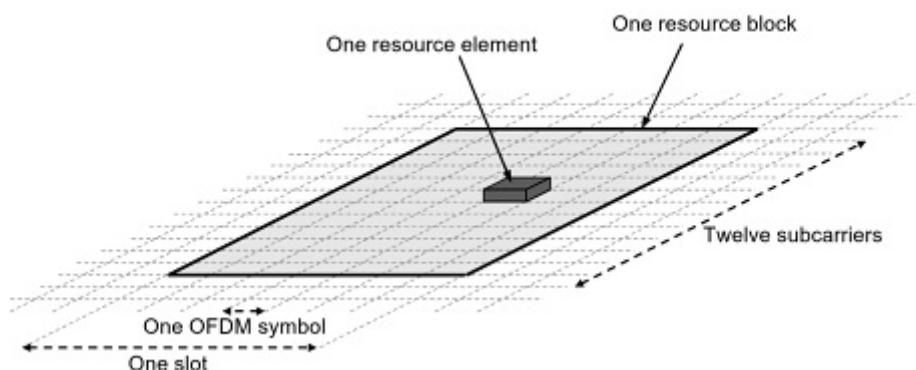


Figura 2.5: Recursos físicos LTE en tiempo y frecuencia [5]

En el modo FDD de LTE para el downlink, cada símbolo OFDM es transmitido en subportadoras de 15 o 7.5 kHz; cada subtrama posee una duración de 1 ms, dos ranuras de 0.5 ms cada una, como se ha mencionado anteriormente. Además contiene varios símbolos OFDM consecutivos (14 y 12 para los modos de 15 y 7.5 kHz, respectivamente). Atendiendo a los 15 KHz que ocupa la subportadora, se obtienen 105 símbolos, como se expresa en la siguiente ecuación

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

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

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

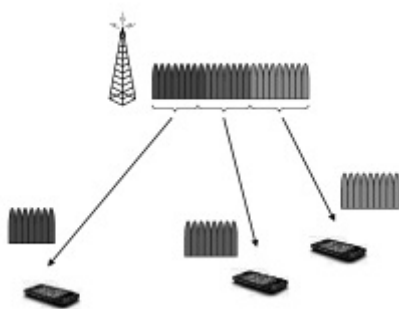


Figura 2.6: Esquema multiplexación de usuarios de LTE

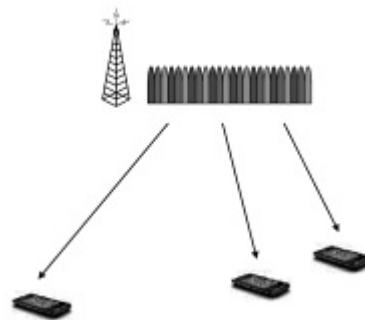


Figura 2.7: Esquema OFDMA de LTE

Transmisión en el UL

El sistema OFDMA proporciona altas velocidades, pero en el enlace ascendente, el consumo de energía en los dispositivos sufre un mayor impacto en la transmisión de datos. Por esta razón, se hace uso de SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para resolver el problema de acceso múltiple. Este esquema se basa en la modulación de una sola portadora. En la Figura 2.8 puede apreciarse la diferencia entre ambos esquemas de transmisión.

La principal ventaja de SC-FDMA frente a OFDMA, es que este tipo de transmisión tiene menor PAPR (Peak-to-Average Power ratio). Ofrece

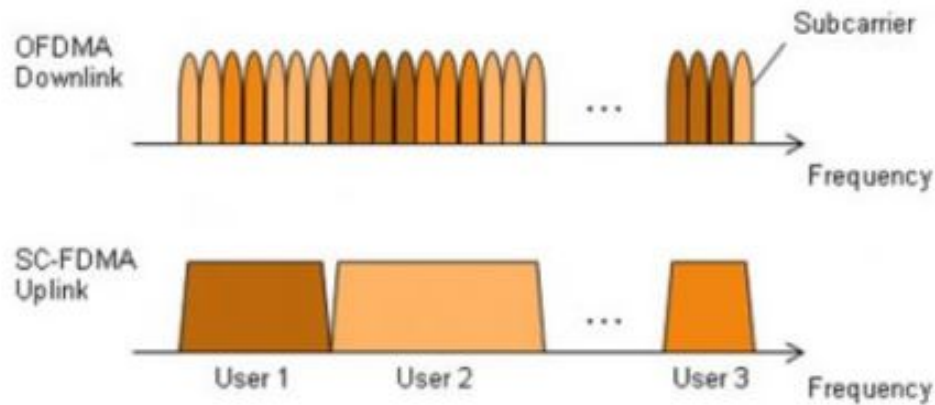


Figura 2.8: Diferenciación en la modulación para enlace de subida y de bajada

además, otro tipo de ventajas como las que se enumeran a continuación [6]:

- Reduce la complejidad, a la vez de ofrecer una alta calidad de ecualización en el dominio de la frecuencia.
- Maximiza la utilización de las redes celulares actuales y futuras. Sufre una baja sensibilidad al desplazamiento de la frecuencia portadora.
- Una asignación de ancho de banda flexible.
- Se ve afectada en menor medida por la distorsión no lineal y, por lo tanto, permite el uso de amplificadores de bajo coste, baja PAPR (propiedad de una sola portadora). Mayor robustez contra espectros nulos.

El módulo básico de la estructura SC-FDMA, se utiliza en el sistema de comunicación tanto en el extremo de transmisión como de recepción. En el extremo del transmisor, se utiliza un módulo conversor Serie a Paralelo (S/P) para la conversión de la señal. La señal paralela se pasa a continuación, a través de un DFT (Discrete Fourier Transform) de M puntos donde ($M < N$), que transforman los símbolos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Después, los símbolos resultantes, se asignan a la banda deseada, en el ancho de banda del canal completo, antes de ser convertidos de nuevo al dominio de tiempo. La señal es

transformada de paralelo a serie y a la resultante se le añade el prefijo cíclico, para reducir la interferencia entre símbolos.

En el extremo del receptor, se sigue un proceso inverso. En primer lugar, la señal analógica se convierte en señal digital, utilizando un convertidor analógico-digital. A continuación se elimina el prefijo cíclico. La señal resultante se pasa a través de un convertidor de serie a paralelo (S/P). Las señales formadas en paralelo son pasadas a través del DFT de N puntos, que transforman los símbolos del dominio del tiempo al de la frecuencia. Los símbolos se convierten de nuevo al dominio del tiempo, y de paralelo a serie para su detección original [7].

2.2.3. Sectorización

El área de cobertura de una estación base carece de una forma determinada; por eso, en el inicio de los sistemas móviles, se necesitó aproximarla con una forma geométrica regular, para poder analizar su rendimiento. Si se cuenta con una antena omnidireccional, la aproximación inmediata de su patrón de radiación sería la de un círculo, aunque, se generarían solapamientos al teselar un terreno, como se muestra en la Figura 2.9. Por tanto se optó por emplear el hexágono regular, como puede observarse en la Figura 2.10. El área cubierta por una estación base, recibe el nombre de célula.

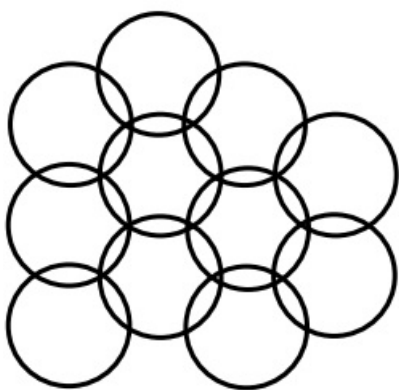


Figura 2.9: Área cubierta con círculos

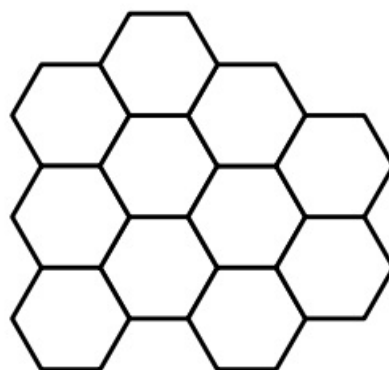


Figura 2.10: Área cubierta con hexágonos

Partiendo de este sistema celular, con el objetivo de reducir las señales interferentes, se emplea la sectorización, que es una técnica ampliamente

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

Sin embargo, al sectorizar aparecen también ciertas desventajas:

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

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

2.2.4. Modelos de propagación

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

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

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

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

- P_L pathloss, calculado a partir de σ (dependiente del escenario) y de L (pérdidas de propagación). El pathloss puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación: $PL = L + \sigma$

- MCL (Minimum Coupling Losses) son las pérdidas por acoplamiento, que pueden tomar los valores que se recogen en la Tabla 2.3
- G_{tx} Ganancia de la antena de transmisión
- G_{rx} Ganancia de la antena receptor

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

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

Donde:

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

$$d'_{BP} = 4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot f \cdot c \quad (2.5)$$

Cuadro 2.1: Modelo de propagación

ESCENARIO		PL[dB]	SHADOW FADING STD[dB]	DEFAULT VALUES
URBAN MACRO (UMa)	LOS	$PL = 22,0 \cdot \log_{10}(d) + 28,0 + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < d'_{BP}$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1.5m$
		$PL = 40 \cdot \log_{10}(d_1) + 7,8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < 5000m$ $h_{BS} = 25m,$ $h_{UT} = 1.5m$
	NLOS	$PL = 161,04 - 7,1 \cdot \log_{10}(W) + 7,5 \cdot \log_{10}(h) - (24,37 - 3,7(h/h_{BS})^2) \cdot \log_{10}(h_{BS}) + (43,42 - 3,1 \cdot \log_{10}(h_{BS})) \cdot (\log_{10}(d) - 3) + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c) - (3,2 \cdot (\log_{10}(11,75 \cdot h_{UT}))^2 - 4,97)$	$\sigma = 6$	$10m < d < 5000m$ $h = avg.buildingheight$ $W = street\ width$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1,5m,$ $W = 20m, h = 20m$ <i>The applicability ranges :</i> $5m < h < 50m$ $5m < W < 50m$ $10m < h_{BS} < 150m$ $1m < h_{UT} < 10m$
URBAN PICO (UPi)	LOS	$PL = 22,0 \cdot \log_{10}(d) + 28,0 + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 3$	$10m < d < d'_{BP}$ $h_{BS} = 10m, h_{UT} = 1.5m$
		$PL = 40 \cdot \log_{10}(d_1) + 7,8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 3$	$10m < d < 5000m$ $h_{BS} = 10m,$ $h_{UT} = 1.5m$
	NLOS	$PL = 36,7 \cdot \log_d + 22,7 + 26 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < 2000m$ $h_{BS} = 10m, h_{UT} = 1.5m$

Cuadro 2.2: Probabilidad de LOS

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

Cuadro 2.3: Pérdidas por acoplamiento (MCL)

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

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

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

2.2.5. Redes heterogéneas

Una planificación eficaz de la red es esencial para hacer frente al creciente número de abonados de datos móviles con servicios de gran ancho de banda que compiten por recursos radio limitados. Los operadores han superado este desafío aumentando la capacidad ampliando el espectro radioeléctrico, añadiendo técnicas de antenas múltiples y aplicando esquemas de modulación y codificación más eficaces, como se ha comentado en los apartados previos.

Sin embargo, estas medidas por sí solas son insuficientes en los entornos más densos y en los bordes celulares, donde el rendimiento puede degradarse significativamente. Por esta razón, los operadores están desplegando celdas pequeñas (small-cells, Scell) e integrándolas estrechamente con las redes tradicionales de macro celdas (macro cells, Mcell), para distribuir cargas de tráfico, mantener el rendimiento y la calidad de servicio, mientras reutilizan el espectro de manera más eficiente.

La arquitectura de red de LTE se compone de tres componentes principales, el equipo de usuario (UE), la Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS (E-UTRAN) y el núcleo de paquetes evolucionado (EPC).

E-UTRAN se encarga de las comunicaciones radio entre el móvil y el EPC, y sólo tiene un componente, las estaciones base evolucionadas, llamadas eNodeB o eNB. Cada eNB es una estación base que controla los móviles en una o más celdas. El eNB envía y recibe transmisiones radio a todos los móviles, utilizando las funciones de procesamiento de señales analógicas y digitales de la interfaz aérea LTE y controla la operación de bajo nivel de todos sus móviles, enviándoles mensajes de señalización tales como comandos de traspaso.

Una manera de expandir una red de estaciones macro, manteniéndola como una red homogénea, es “densificarla”, agregando más sectores por eNB o desplegando más macro-eNBs. Sin embargo, encontrar nuevos emplazamientos para macros, se hace cada vez más difícil y puede ser costoso, especialmente en los centros urbanos. Una alternativa es introducir células pequeñas a través del despliegue de estaciones base de baja potencia (eNBs, HeNBs o Nodos de Reenvío(RN)) o Remote Radio Heads (RRH) a los eNBs macro ya existentes. Adquirir un emplazamiento para este tipo de equipo es más fácil y más barato [1].

Las células pequeñas se añaden, principalmente, para aumentar la capacidad en los puntos con una mayor demanda de los usuarios (hotspots) y para potenciar las áreas no cubiertas por la red de macros, tanto al aire libre como en interiores. También mejoran el rendimiento de la red y la calidad del servicio, mediante la descarga de las células macro grandes. El resultado es una red heterogénea con macrocélulas grandes en combinación con células pequeñas que proporcionan velocidades de bits incrementadas por unidad de área.

En redes heterogéneas, las células de diferentes tamaños se denominan macro, micro, pico y femto células (enumerados en orden descendente en cuanto a potencia de transmisión). El tamaño real de las celdas depende, no sólo de la potencia del eNB, sino también de la posición de la antena, así como del entorno de localización. Para este trabajo, se han empleado celdas de tipo macro y pico.

La introducción de varios tamaños de celdas y la generación de una red heterogénea contribuye a incrementar la complejidad de la planificación de red. En una red con una frecuencia de reutilización de uno, el usuario

normalmente se conecta a la célula con la señal más fuerte recibida en el downlink (SS_{DL}), por lo que el borde entre dos células se encuentra en el punto donde SS_{DL} podría ser similar. En redes homogéneas, esto también coincide típicamente con el punto de pérdida de trayectoria para el enlace ascendente (PL_{UL}) en ambas células. En una red heterogénea, con nodos con mayor potencia en las células grandes y de baja potencia en las pequeñas, el punto de SS_{DL} no es necesariamente el mismo que el de PL_{UL} . Esta es una de las propiedades de las redes heterogéneas que se analizarán en este proyecto.

En la Figura 2.11, puede apreciarse un eNB en una macro celda y una estación base de menor potencia en una small cell. El punto en el que la PL_{UL} es el mismo, se sitúa más cerca del nodo macro que el punto de igual SS_{DL} .

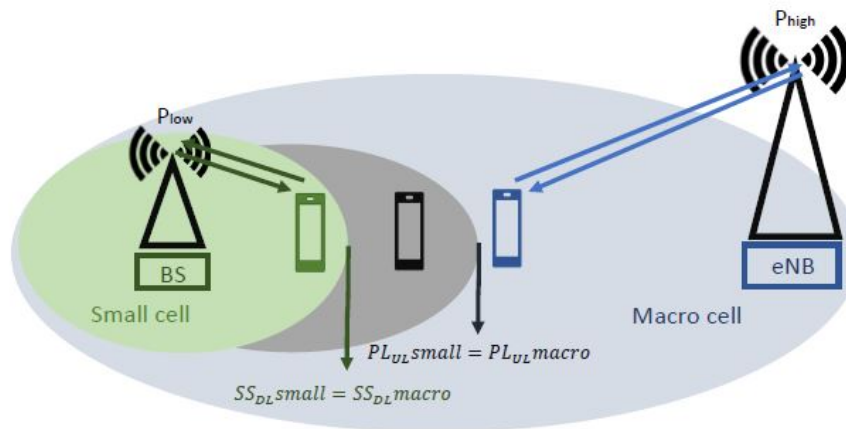


Figura 2.11: Representación puntos PL_{UL} y SS_{DL} en una red heterogénea

2.3. Técnicas de acceso

Como se ha visto en el apartado anterior, con el fin de mejorar la cobertura celular y lograr una mayor eficiencia espectral, el concepto de Heterogeneous Networks (HetNets) se ha propuesto en las estandarizaciones de LTE-Advanced.

En el escenario Macro-Pico HetNet, las Scell se despliegan típicamente dentro de las áreas de cobertura de Mcell, lo cual, podría generar un

desequilibrio entre las celdas macro y pico. Por esta razón, se proponen algunas estrategias de selección de acceso.

En este trabajo se va a evaluar el rendimiento de distintos despliegues de redes haciendo uso de tres tipos distintos de técnicas de acceso: Reference Signal Received Power (RSRP), Cell Range Expansion (CRE) y Downlink/Uplink decoupling (DUDe).

La última sección de este capítulo tiene como propósito analizar las características esenciales de las tres técnicas de acceso mencionadas.

2.3.1. RSRP

En las redes LTE tradicionales (homogéneas), la selección de célula en los usuarios, se realiza comparando la señal recibida de referencia, RSRP y la calidad de recepción de la señal de referencia (RSRQ), transmitida desde las células macro. De este modo, la celda seleccionada por el usuario, es aquella capaz de proporcionar un mayor valor de RSRP.

El valor de RSRP se obtiene a partir de un conjunto de mediciones de capa física llevadas a cabo en el eNodeB, a través de señales enviadas por el UE. Por ejemplo, el UE mide la potencia de la señal recibida del eNodeB cercano reportándolo al eNodeB al que está conectado. Además, la RSRP es uno de los parámetros principales en la arquitectura LTE, ya que se utiliza en la selección, re-selección y traspaso de los eNodeB [8].

En este método de acceso, la elección de la célula de servicio está determinada por la potencia máxima recibida del enlace descendente.

$$CellID_{serving}(j) = \arg \max_{\{i\}} \{RSRP_{ij}\} \quad (2.6)$$

La gran desventaja de este sistema de selección de la “señal más fuerte.”^{en} redes heterogéneas, es que pocos usuarios seleccionarían el nodo de baja potencia para cursar los servicios, debido principalmente, a la gran diferencia de potencia de transmisión entre la macro (potencia típica de transmisión: 43-46 dBm, ganancia de antena: 12-15 dBi) y los nodos de baja potencia (23-30 dBm de potencia de transmisión y 0-5 dBi de

ganancia de antena para picos), lo que genera que la cobertura del enlace descendente de una célula pico sea mucho menor que la de una macro.

Si la selección de células del servidor se basa en la intensidad de la señal recibida en el enlace descendente, la mayor cobertura de la macro puede limitar los beneficios de la división celular, porque las macrocélulas atraen a la mayoría de los usuarios hacia ellas, pudiéndose dar el caso de que las macro no dispongan de recursos suficientes para servir de manera eficaz a estos UE, mientras que las células pequeñas no estén sirviendo a ningún usuario [9].

Para los escenarios HetNet, el aumento del número de UEs atendidos por las celdas de baja potencia puede aportar una ganancia de rendimiento significativa, especialmente para los usuarios situados en el borde de la celda. Por lo tanto, a veces es más beneficioso para los usuarios, conectarse a una celda de baja potencia, incluso cuando no es la que aporta la mayor potencia recibida. En los siguientes apartados se explican dos estrategias diferentes, con las que se logra que haya un mayor número de usuarios conectados a las celdas de baja potencia.

2.3.2. CRE

Una forma de asegurar que las células pequeñas sirvan a suficientes usuarios en entornos heterogéneos, es aumentar virtualmente su área de cobertura, lo cual puede lograrse mediante el uso de un offset positivo (bias), respecto a la potencia recibida de dicha célula (Ecuación 2.7). Esta extensión de la cobertura, se denomina Cell Range Extension (CRE).

En este caso, la célula de servicio de un UE se selecciona de acuerdo a los siguientes criterios:

$$CellID_{serving}(j) = \arg \max_{\{i\}} \{RSRP_{ij} + Bias\} \quad (2.7)$$

En la Ecuación 2.7, el valor Bias, es el offset para la selección de células, 0 para macrocélula y un valor empírico para células de baja potencia. Esto implica que un UE no siempre se conecta al eNB con la mayor potencia recibida en el enlace descendente, lo que da lugar a una

expansión del alcance de las células de baja potencia, permitiendo que más UE seleccionen células de baja potencia para conectarse con ellas.

Como resultado, se puede desviar un cierto tráfico de la macro-red hacia múltiples celdas de baja potencia que, pueden utilizar simultáneamente el mismo ancho de banda. Un efecto negativo de esto, es el aumento de la interferencia en el downlink, experimentado por el UE situado en la región CRE y servido por la Scell. Para mitigar el problema de esta macrointerferencia, se hace uso de una serie de características añadidas a la especificación 3GPP LTE, como por ejemplo el uso de frecuencias ortogonales.

Sin embargo, el principal problema de esta técnica es que el valor óptimo del bias depende de la distribución de los UE y el despliegue de nodos eNB y pico, por lo que es muy difícil de calcular [9].

Para la realización de este trabajo se han establecido tres valores diferentes de bias 6, 8 y 12dB, como se contemplará mas adelante en el Capítulo 4.

2.3.3. DUDe

Desde los comienzos de la telefonía móvil, los enlaces descendente y ascendente han estado acoplados, es decir, los terminales móviles se han asociado con la misma estación para cursar tráfico en ambas direcciones. En las dos técnicas analizadas hasta ahora (RSRP y CRE) se ha considerado esta estrategia en la que el usuario se conecta a la misma celda tanto en enlace ascendente como descendente.

Además, las redes celulares se diseñan a menudo basadas en el enlace descendente; esto se debe al hecho de que el tráfico de red es, en su mayoría asimétrico, de manera que el rendimiento requerido en el enlace descendente es mayor que en el ascendente. Sin embargo, el ascendente es cada vez más importante, con el crecimiento de redes de sensores y comunicaciones tipo máquina (MTC), donde el tráfico suele estar centrado en dicha dirección, o la creciente popularidad de aplicaciones de tráfico simétricas, como redes sociales, video llamadas o videojuegos.

Como consecuencia, la optimización del UL se ha vuelto cada vez más importante.

Si se considera un escenario típico de HetNet con una Mcell y una Scell, la cobertura de DL del Mcell es mucho mayor que la Scell, debido a la gran diferencia en las potencias de transmisión de ambas celdas. Sin embargo, en el enlace ascendente, todos los transmisores (dispositivos móviles alimentados por baterías) tienen aproximadamente la misma potencia de transmisión y, por lo tanto, el mismo rango de cobertura. De esta forma, un UE que está conectado a una Mcell en el DL de la que recibe el nivel de señal más alto, podría querer conectarse a una Scell en el UL, para la que las pérdidas de propagación son inferiores.

A medida que los escenarios HetNets se hacen más densos y las células son más pequeñas, aumenta la diferencia de potencias de transmisión entre Mcells y Scells y, como consecuencia, aumenta la distancia entre los límites óptimos de las células DL y UL. Con el fin de optimizar el rendimiento de estas redes, es necesario un nuevo enfoque, donde el UL y el DL se tratan básicamente como entidades de red separadas, y un UE puede conectarse a diferentes nodos de servicio en el UL y DL [10].

La técnica de acceso donde la asociación de células del enlace descendente se basa en la potencia recibida de dicho enlace, mientras que la asociación del ascendente, se basa en las pérdidas de propagación, se conoce con el nombre de Downlink and Uplink Decoupling, DUDe.

A continuación, se detallan algunas de las ventajas estudiadas en [11], que pueden obtenerse mediante el uso de las técnicas DUDe.

- Un aumento en el valor SNR para el UL y una reducción de la potencia transmitida.

Como ya se ha explicado, un dispositivo que está asociado con una Mcell en el DL, podría asociarse con una Scell en el UL. Los efectos positivos son dos: para UEs que están transmitiendo a la potencia máxima, una conexión a una BS más cercana proporciona una relación señal-ruido más alta (SNR); además, para una SNR de objetivo fijo, unas pérdidas de propagación inferiores permiten una reducción en la potencia de transmisión, a través del control de potencia.

- Una mejora en las condiciones de interferencia

Como consecuencia de la reducción de potencia de transmisión comentada en la sección anterior, la interferencia UL generada a otras BSs se reduce considerablemente.

Además, DUDe proporciona la capacidad de seleccionar de forma independiente la asociación que minimiza la interferencia tanto en el UE como en la BS. La interferencia de enlace ascendente en una banda espectral dada depende de la posición del UE respecto a la BS deseada, de la cantidad de control de potencia y de los pesos de precodificación UL. Mientras que en el caso del enlace descendente, depende de la potencia de transmisión de las BSs, de los pesos de formación de haz de DL y de la distancia a las diferentes BSs. Los niveles pueden ser muy diferentes en los recursos DL y UL. Por lo tanto, se puede esperar que una asociación desacoplada que permita al UE o la a la red buscar el mejor entorno de interferencia de forma independiente en cada enlace, supere sustancialmente el comportamiento de una asociación acoplada, la cual debe “dividir la diferencia”.

- Una mejora en la tasa de datos del uplink.

El aumento de la potencia recibida y la disminución de la interferencia conducen a una SINR más alta y, por lo tanto, a una mayor eficiencia espectral y velocidad de datos.

- Un balanceo de carga diferente en UL y el DL.

La carga que tiene una BS dada en el UL puede ser diferente de la carga que tiene la misma BS en el DL. Así, no es óptimo tener el mismo conjunto de UE conectados a la misma BS tanto en el UL como en el DL. DUDe permite “empujar” más UEs a células pequeñas, infrautilizadas en el UL.

- Bajo coste de despliegue con una RAN centralizada.

El requisito principal que impone DUDe, es una conexión de baja latencia entre las BS de DL y UL para permitir el intercambio rápido de mensajes de control, como los de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ). Sin embargo, a diferencia de las formas más sofisticadas de cooperación multipunto (CoMP), donde se requiere una conexión backhaul de alto rendimiento entre BSs

para permitir el intercambio rápido de datos, DUDe no impone un requisito estricto en la capacidad de backhaul. Dicho de otro modo, DUDe permite ganancias similares al procesamiento conjunto de enlace ascendente, pero con menores costos de implementación.

La tendencia actual hacia una centralización parcial o completa de la red de acceso por radio (RAN) en los despliegues, en los que está disponible un backhaul de alta velocidad, servirá para facilitar el desacoplamiento de DL y UL, ya que la señalización será enviada a una unidad central de procesamiento con conexiones de baja latencia.

Durante la realización de este trabajo, se estudiará más en profundidad, a través de diferentes despliegues de redes, algunas de las ventajas mencionadas, para comparar los beneficios de las diferentes técnicas de acceso planteadas, en términos de eficiencia y throughput.

Capítulo 3

Entorno de simulación

En este capítulo se procede a la presentación del diseño e implementación de la herramienta empleada para llevar a cabo este trabajo, desarrollada por el Grupo de Ingeniería Telemática. Esta sección está estructurada en dos partes, una primera en la que se realiza una introducción teórica a los distintos tipos de simuladores y otra en la que se define de forma más detallada el funcionamiento y estructura del marco utilizado para la ejecución de este trabajo.

Las herramientas que se han venido empleando hasta ahora en la comunidad científica para el estudio y análisis de redes de sistemas de comunicaciones, presentan bastantes limitaciones a la hora de representar escenarios complejos, como puede ser, por ejemplo, un entorno LTE.

Los simuladores empleados en la actualidad podrían clasificarse en 3 tipos en función del nivel de abstracción requerido:

- Simuladores a nivel de enlace

Centrados en el estudio del último salto (inalámbrico) de la comunicación, facilitan así la evaluación de técnicas de nivel de enlace, como la estimación de canal, soluciones Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) relacionadas con el Adaptive Modulation and Coding (AMC). Dentro de este grupo, Vienna LTE Simulator, destaca como una de las soluciones más ampliamente adoptadas

- Simuladores a nivel de sistema

Presentan una mayor flexibilidad que el grupo anterior, aunque como contrapartida suelen requerir alguna simplificación, con la

consiguiente pérdida de precisión. La mayoría de los simuladores a nivel de sistema se basan en desarrollos propietarios (normalmente implementados en MATLAB), aunque en algunos casos se usan herramientas específicas, donde nuevamente destaca el simulador LTE Vienna.

- Simuladores de red

Esta clase presenta un alto grado de detalle en su implementación y modelos. Sin embargo, debido a esta elevada precisión, se encuentra bastante limitada por los tiempos para realizar los análisis. En este grupo, existen varias plataformas, aunque la que seguramente está recibiendo más atención últimamente es ns-3, y su extensión LTE-EPC Network Simulator (LENA), que se encuentra en constante evolución.

Para el estudio de sistemas como LTE, se requiere un análisis tanto de las capas inferiores de las redes celulares (gestión de recursos), así como de las capas superiores, para incorporar técnicas de virtualización (Network Function Virtualization (NFV) y Software Defined Networking (SDN)) de forma simultánea. Sin embargo, los simuladores de enlace y de sistema se centran en las capas inferiores, por lo que normalmente no son capaces de reflejar de manera apropiada diferentes patrones de servicio, adoptando habitualmente modelos de saturación o full-buffer. Por otro lado, en los simuladores de red, los tiempos de simulación son bastante elevados, de modo que los análisis normalmente no cubren periodos de tiempo prolongados. Como consecuencia, en muchas ocasiones se opta por desarrollos propietarios, lo que requiere invertir un tiempo elevado en su desarrollo.

Para la realización de este trabajo se ha empleado la herramienta Generic Wireless Network System Modeler (GWNSyM). Se trata de una plataforma flexible que habilita la simulación de sistemas complejos, diseñada a modo genérico, para que sea fácilmente extensible con nuevas funcionalidades o soluciones de red.

3.1. Características generales

En esta plataforma, la simulación del sistema está basada en fotografías o *snapshots*, a diferencia de otros entornos basados en eventos, de forma que en cada fotografía se reflejan los diferentes modelos implementados sobre los elementos de red desplegados, y en un orden establecido.

En cuanto al entorno de simulación, este ha sido implementado como un conjunto de librerías en *C++*, con el objetivo de poder reutilizar el código generado en el entorno GWNSyM en otros entornos y viceversa.

Por ello, la herramienta no se ha diseñado imponiendo restricciones de herencias a las clases *C++* que implementan las diferentes entidades y modelos del simulador, sino que hay establecido un interfaz mínimo, que asegura la interacción de elementos GWNSyM. Se asegura así, la compatibilidad de los diferentes elementos implementados dentro de GWNSyM, fomentando, la separación de los modelos del sistema en el que se ejecutan.

Se ha añadido también a la herramienta, una funcionalidad de wrapper, que permite la integración de código existente dentro del entorno de simulación, dotándolo del interfaz requerido.

3.1.1. Elementos de simulación

Esta herramienta esta basada en dos elementos principales: los *Tipos*, los cuales representan los elementos de red y las *Acciones*, que se encargan de implementar los modelos que se aplican sobre esos *Tipos*.

Tipos

Los *Tipos* se encargan de definir la estructura de un elemento de red de forma general, junto con una configuración concreta. En este sentido, un elemento puede abarcar desde dispositivos de usuario a operadores, pasando por servicios o elementos virtuales. De acuerdo a su configuración, un *Tipo* puede agregar elementos de otro *Tipo*, de forma que se pueda definir la composición de cada elemento de red como una combinación de *Tipos*.

La instancia de elementos de un determinado *Tipo* define el conjunto de elementos correspondiente. A modo de ejemplo, la Figura 3.1 ilustra la creación de *Tipos* en GWNSyM para un caso genérico. Como se puede ver, el sustrato de los *Tipos* consiste en clases *C++* que, junto a una configuración concreta, da lugar a un *Tipo*. Así, la Figura *Tipos* muestra cómo una misma clase *C++* *C1*, da lugar a dos *Tipos* (*T1* y *T2*), en función de la configuración que le aplica. Además, de acuerdo a la configuración, las instancias de cada *Tipo* pueden dar lugar a diferentes agregaciones.

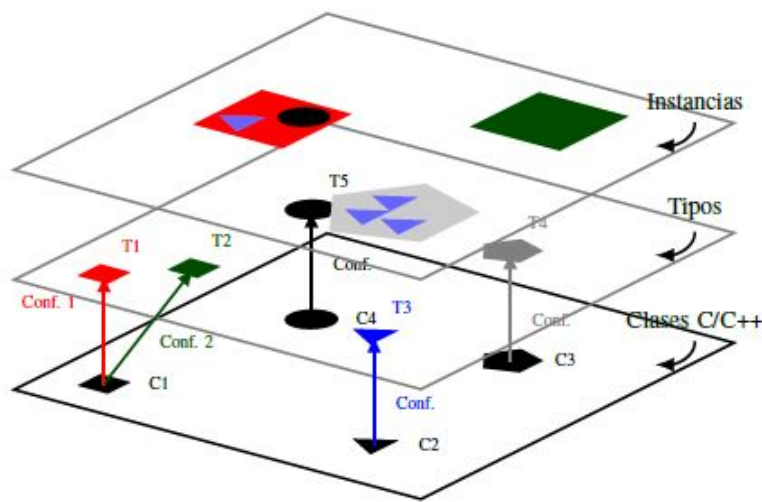


Figura 3.1: Modelo de instanciación de GWNSyM

Acciones

Las *Acciones* representan un modelo particular que se va a aplicar a uno o más conjuntos de *Tipos*. En general, las *Acciones* representan comportamientos del sistema en sentido amplio, pudiendo abarcar desde fenómenos físicos, tales como modelos de propagación, a políticas concretas, como selección de acceso. Cada acción toma como parámetros uno o más conjuntos de *Tipos*, y se ejecutan de forma secuencial en cada fotografía del escenario. En este sentido, las acciones tienen lugar en el bucle más interno de la simulación. Por otro lado, hay ocasiones en las que una determinada acción únicamente tiene sentido al inicio o final del experimento, como el despliegue de elementos estáticos, por ejemplo. Estos supuestos se han tenido en cuenta definiendo dos categorías de

acciones, *Pre-Acción* y *Post-Acción*, que se ejecutan al principio y final del experimento, respectivamente.

3.1.2. Metodología de la simulación

Una instancia de simulación, o experimento, representa el análisis de un escenario concreto, sujeto a una configuración específica. Cada experimento contiene dos bucles: uno exterior y otro interior. El primero realiza iteraciones fotografía a fotografía, actualizando el estado de la red de acuerdo al resultado de la iteración (fotografía) anterior. Por su parte, el segundo bucle se encarga de aplicar los modelos correspondientes a los elementos de red dentro de una fotografía. El Algoritmo 1 ilustra la metodología general. Como primer paso, se definen los *Tipos*, y se crean sus instancias, dando lugar a los conjuntos previamente mencionados, de acuerdo a su configuración. Seguidamente, una vez que todos los elementos del sistema han sido instanciados, se ejecutan las acciones definidas como Pre-Acciones, que son especialmente útiles para el despliegue de elementos estáticos. Posteriormente, se inicia el primer bucle, línea 13, que itera sobre cada fotografía, y el bucle interior, línea 14, que se encarga de ejecutar las acciones de forma secuencial. Tras finalizar ambos bucles, se aplican aquellas acciones definidas como Post-Acciones, normalmente encargadas de extraer resultados y generar trazas.

3.1.3. Ejemplo

A modo de ejemplo, el Código que aparecen a continuación, reflejan los principales aspectos de la definición de un escenario. Como se puede observar en el Código 3.1, el primer paso es en el registro de tipos dentro del sistema. Los tipos consisten en dos objetos *C++*: el elemento de red y su configuración. Por ejemplo, el tipo *USER* se define en base a los objetos *User* y *UserConf*. Antes de instanciar los elementos de cada tipo, el sistema comprueba cuales son los que debe agregar, a través del nombre del tipo correspondiente. Como se muestra en el Código 3.1, la configuración del tipo *USER* indica que agrega una instancia del tipo *LTE_UE*, de modo que se instancia un elemento del tipo *LTE_UE* por cada elemento del tipo *USER*.

Algorithm 1 Flujo de simulación genérico

```

1: Definición de Tipos
2: Configuración
3: Instanciación y agregación
4:  $T \leftarrow Sets$ 
5:  $A_{pre} \leftarrow Pre\text{-}Actions$ 
6:  $A \leftarrow Actions$ 
7:  $A_{post} \leftarrow Post\text{-}Actions$ 
8:  $i = 0$ 
9:  $n \leftarrow \# Snapshots$ 
10: for  $b \in A_{pre}$  do
11:   Ejecutar Pre-Action  $b(M_b \subseteq T)$ 
12: end for
13: while  $i < n$  do
14:   for  $a \in A$  do
15:     Ejecutar Action  $s(M_s \subseteq T)$ 
16:   end for
17: end while
18: for  $e \in A_{post}$  do
19:   Ejecutar Post-Action  $e(M_e \subseteq T)$ 
20: end for

```

```

gnsn::System system;
...
system.AddType<User, UserConf>("USER");
system.AddType<LteUe, LteUeConf>("LTE_UE", {Params});
system.AddType<LteCell, LteCellConf>("CELL", {Params});
system.AddType<LteEnb, LteEnbConf>("MACRO", {Params});
...

```

Código 3.1: Definición de *Tipos*

```

UserConf::ReadInnerConf(void) const
{
    return{"LTE_UE", 1}; // read from configuration
}

```

Código 3.2: Agregación

```

system.PreAction<MacroDeploymenttr>({"MACRO"}, {Params.});
...
system.Action<LteScan>({"USER", "MACRO"}, {Params.});
...
system.PostAction<MacroLoad>({"MACRO::*:CELL"}, {Params.});
...
system.Run();

```

Código 3.3: Acciones

Una vez establecidos los tipos, se registran las acciones que definen el comportamiento del sistema, tal y como se muestra en el Código 3.3.

Es importante destacar que se ha dotado al entorno de simulación de un módulo que permite la búsqueda de los elementos instanciados, de forma que el paso de conjuntos de elementos a las acciones se lleva a cabo de una manera muy flexible. Por ejemplo, los elementos indicados en la figura como *MACRO* :: * :: *CELL* se corresponden con un tipo *CELL* agregado en todos los de tipo *MACRO*.

3.2. Caracterización de la herramienta

Una vez explicadas la arquitectura y funcionalidad general de este entorno de simulación, se van a analizar a continuación, los componentes específicamente creados en esta herramienta para el desarrollo del presente trabajo.

En este caso, se han creado cinco *Tipos* de configuración diferentes; cinco clases de elementos con los que se van a a caracterizar y analizar los diferentes escenarios.

- Usuarios
- Dispositivos de usuarios (UE)
- Servicios
- Estaciones base (AEs)
- Celdas

En los archivos de configuración empleados junto a los elementos, para crear los tipos, se guarda información relativa a los servicios, las celdas y los UEs. En estos archivos se especifica el número de UEs y las características de cada clase de usuario, así como los servicios que se están cursando. Se especifica también, la capacidad de los servicios existentes, o el tipo de antenas utilizadas, con su correspondiente potencia de transmisión o el número de sectores. Otro dato a destacar, es el tiempo de snapshot o fotografía, duración de cada iteración, así como el tiempo total. De esta forma, se pueden relacionar los diferentes *Tipos* tal y como se indica en las Figuras 3.2 y 3.3, en las que se puede observar como con un número N de celdas, detallado en el archivo de configuración, se forma

una estación base. De esta misma forma, se aprecia como un usuario se forma “compone” de N servicios y dispositivos, que se encuentran definidos en el archivo de configuración.

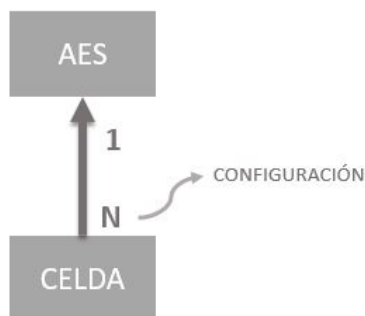


Figura 3.2: Configuración AEs y Celdas



Figura 3.3: Configuración Usuarios, UEs y Servicios

Se emplean también en este caso, unos archivos de trazas, que proporcionan información relativa al identificador de usuario, posición y tipo, así como datos referente al servicio, especificando si el usuario tiene intención de cursarlo o no. Son parámetros, que van cambiando a lo largo de la simulación para un mismo usuario y que, por tanto, deben actualizarse en cada iteración.

Los usuarios y las estaciones base son contenedores que guardan el estado actual que se emplea en las *Acciones*. En el caso de los servicios, es necesario calcular el estado final del servicio, y obtener el número de veces que este es cursado, rechazado o tirado, ya que como se ha comentado, la intención de cursar un servicio concreto, puede cambiar a lo largo de las diferentes iteraciones. Por esta razón, se ha implementado una lógica interna con la cual, partiendo de la información contenida en las trazas sobre si se quiere activar o no un servicio y comprobando que el usuario está cumpliendo todos los requisitos para establecer la conexión, se determina el número de veces que un servicio es cursado, rechazado o tirado. Si dicha intención en el archivo de trazas es 0, el usuario no se conecta. Si por el contrario, el valor de este parámetro es 1, el usuario intentará conectarse a las estaciones base. Para lograrlo, y poder cursar los servicios, se deberán cumplir dos condiciones:

- Que la estación base a la que el usuario se quiera conectar, disponga de recursos suficientes para cursar el servicio demandado.

- Que la $SINR_{DL}$ supere un valor mínimo (fijado a $-3dB$ en este trabajo).

De esta forma, cuando se cumplan estas dos condiciones, el servicio se aceptará. De no ser así, pasará a considerarse que ha sido rechazado o tirado. Atendiendo a la máquina de estados representada en la Figura 3.4, pueden observarse las cuatro situaciones diferentes en las que puede encontrarse un servicio. De los valores que aparecen en las transiciones entre estados, el primero representa la intención de conectarse que tiene el usuario en una determinada fotografía, mientras que el segundo refleja si la conexión ha sido posible o no.

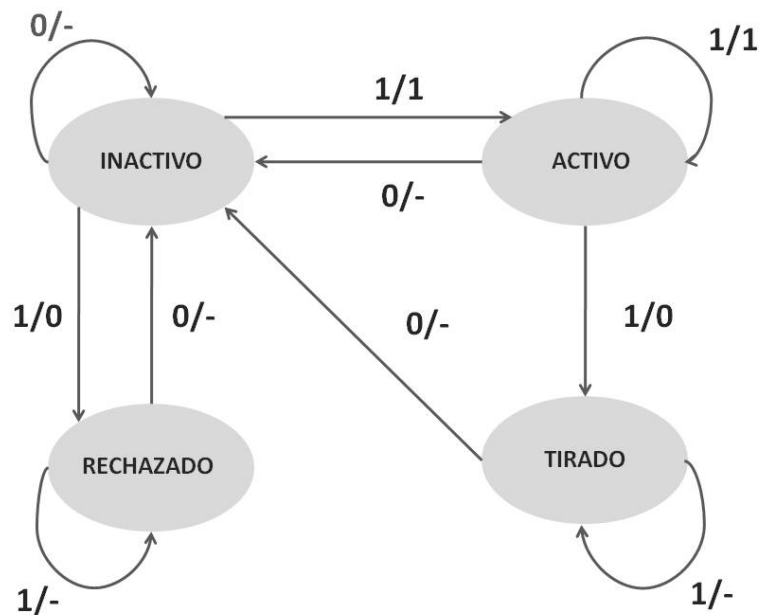


Figura 3.4: Diagrama de estados

- Paso de **inactivo a inactivo**, cuando el servicio no tiene intención de conectarse a la red.
- Paso de **inactivo a activo**, cuando el usuario no está conectado y, teniendo la intención de conectarse a la red, se ha concluido con éxito.
- Paso de **inactivo a rechazado**, cuando el usuario no está conectado y tiene intención de conectarse a la red, pero la conexión se

rechaza. En este caso la intención se mantiene a 0, hasta que la intención real pase de nuevo por 0 y 1, reflejando el comienzo de una nueva llamada o servicio.

- Paso de **activo a activo**, cuando el usuario está conectado y mantiene la intención, y la conexión se sigue aceptando por la red.
- Paso de **activo a inactivo**, cuando el usuario está conectado y su intención es desconectarse.
- Paso de **activo a tirado**, cuando el usuario está conectado y, aunque su intención es seguir estándolo, la red no lo acepta, siguiendo un procedimiento similar al del paso de inactivo a rechazado.
- Paso de **tirado a tirado**, cuando no está conectado y la intención sigue siendo 1, después de haber sido tirado por la red.
- Paso de **tirado a inactivo**, cuando ha sido tirado por la red, y la intención pasa de 1 a 0.
- Paso de **rechazado a rechazado**, cuando ha sido rechazado y mantiene su intención de estar conectado.
- Paso de **rechazado a inactivo**, cuando ha sido rechazado por la red, y la llamada original finaliza, pasando la intención a 0.

Para entender un poco mejor el funcionamiento de los elementos definidos hasta ahora, la Figura 3.5, representa de forma esquematizada, el Algoritmo 1 visto en la sección anterior, adaptado a las funciones de este trabajo. Se muestra, en primer lugar, como se constituye la red, desplegando las estaciones base (*Pre-Acciones*) con la información proporcionada en los archivos de configuración. A continuación se da comienzo a las iteraciones para proceder con el análisis de los escenarios. En este caso, ya no hace falta la información de los archivos de configuración, utilizando únicamente las trazas para desplegar los usuarios y actualizar la intención del servicio. Una vez finalizadas todas las *Acciones* para todas las iteraciones (los dos bucles definidos en el algoritmo), se procederá al análisis de los resultados obtenidos (*Post-Acciones*).

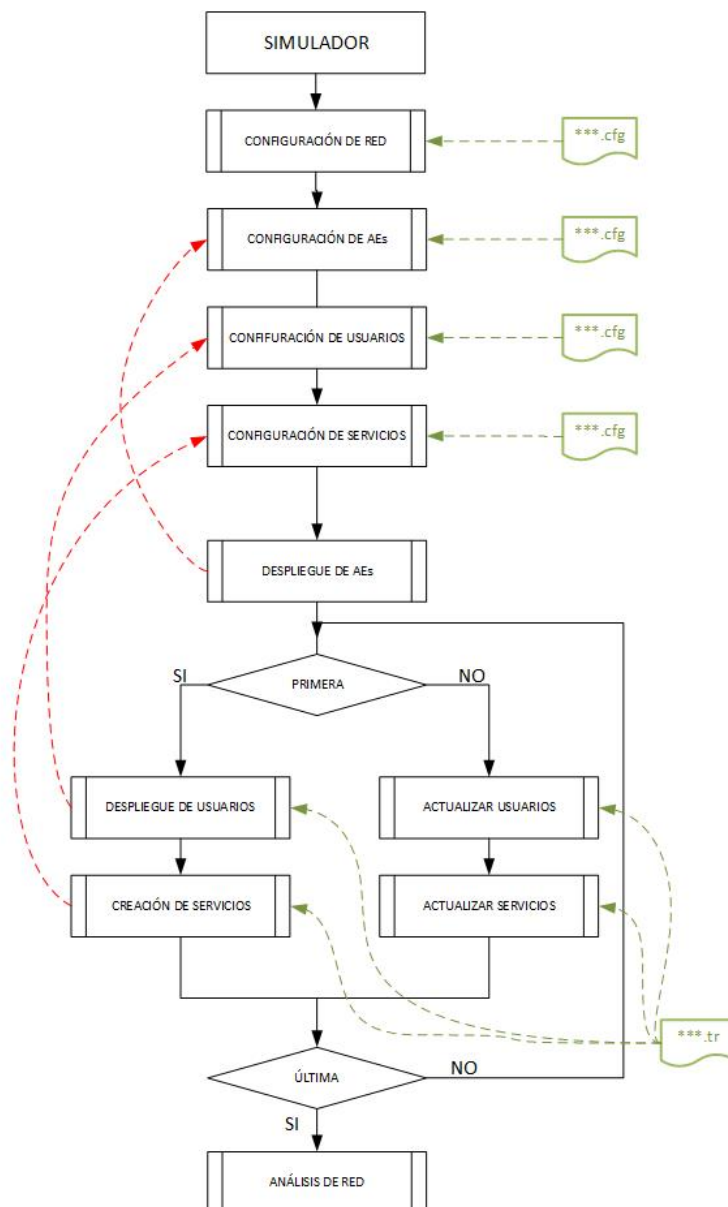


Figura 3.5: Esquema del simulador empleado

3.2.1. Acciones

Para la realización de este trabajo se han creado distintos escenarios, en los cuales se definen el conjunto de *Tipos* y de *Acciones* que interesa ejecutar en una simulación, para obtener los resultados deseados en cada caso y analizar de esta forma el comportamiento de la red. En el escenario se define asimismo, su tamaño para saber cuál es la superficie en la que el usuario debe moverse.

Se van a mencionar a continuación, las diferentes *Acciones* creadas en este trabajo.

1. Potencia recibida

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

Para hacer el cálculo de esta potencia, se utiliza la expresión (2.4), explicada en el capítulo anterior, al introducir los modelos de propagación (2.2.4). Tanto las ganancias de transmisión y recepción, como la potencia transmitida y el número de sectores, se obtienen del Tipo de la estación base (macro o pico), pues son valores que no cambian durante una simulación. Por otro lado, las pérdidas de propagación se calculan siguiendo las indicaciones dadas en la Tabla 2.1, vista también en la sección 2.2.4 del capítulo anterior.

De esta forma, se recorren primero los usuarios, y para cada uno se itera el conjunto de estaciones base, teniendo en cuenta los 3 sectores de las estaciones macro, calculando las pérdidas de propagación y la potencia recibida por cada uno. Esta información se registra en dos vectores. En el primero se guarda, para cada usuario, los identificadores de todos los sectores de las estaciones de las que recibe señal, ordenados según la potencia recibida, así como el tipo de estación. En el segundo, se almacena la misma información, ordenada en función del pathloss (creciente).

2. Selección de celda para DL

Una vez calculados los valores de potencia recibidos por cada uno de los sectores, se pasa a seleccionar la celda a la que el usuario va a conectarse en el enlace descendente, en función de su tipo de acceso (RSRP, CRE o DUDe).

Para ello, del vector obtenido en la anterior clase, con las celdas ordenadas de forma decreciente según la potencia recibida, se escoge la primera, que se corresponde con aquella de la que recibe un mayor valor de señal. Esto para el caso de RSRP y DUDe. En el caso

de que la técnica de acceso sea CRE, se llamará internamente a otra clase, a la que se le añadirá a las señales recibidas desde las estaciones pico, un valor de potencia (bias) a la potencia recibida, antes de seleccionar una.

Una vez escogida la celda a la que el usuario desea conectarse (la de mayor potencia recibida), se pasa al cálculo de la SINR. En el caso de CRE, aunque se haya incrementado la potencia para escoger la celda, una vez seleccionada, se utilizará el valor real de señal recibida por esa estación.

La SINR en el enlace descendente se calcula mediante la expresión 3.1.

$$SINR_{DL} = \frac{P_{Rx}}{N_0 \cdot Bw_{Rb} + Interferencia} \quad (3.1)$$

Para la ecuación 3.1, los parámetros quedan definidos como se comenta a continuación:

- P_{Rx} : potencia recibida por la estación base a la que el usuario a decidido conectarse.
- N_0 : ruido blanco gaussiano, como $N_0 = K \cdot T$, donde T es la temperatura ambiente $T = 300^\circ$ Kelvin y K es la constante de Boltzmann $K = 1,38 \cdot 10^{-23}(J/K)$.
- $Bw_{Rb} = 180KHz$, ancho de banda por resource block.
- *Interferencia*: suma total de la potencia recibida por el usuario desde todas las estaciones base de las que recibe señal, tanto las de su cluster, como las de los clusters que pueda haber desplegados alrededor.

Una vez obtenida la SINR, se calcula el número de resource blocks que el usuario necesita para satisfacer la demande de un determinado servicio. Para esto, se emplea la ecuación 3.2.

$$N_{Rb} = \frac{\text{Capacidad total}}{Bw_{Rb} \cdot Bw_{eff} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{SINR}{SINR_{eff}} \right)} \quad (3.2)$$

Donde:

- Capacidad total, requisito del servicio al que el usuario va a conectarse.
- $Bw_{Rb} = 180KHz$, ancho de banda de cada recurso
- Bw_{eff} , ancho de banda eficaz, que se corresponde con la constante 0.85.
- $SINR$, valor calculado en el paso anterior.
- $SINR_{eff}$, eficiencia de la SINR, con un valor ajustado a 1.25.

3. Selección de celda para UL

En el caso del uplink, se han creado 2 *Acciones* distintas en función del tipo de técnica empleada en el acceso. Con una se hace la selección para el caso de que la técnica de acceso sea RSRP o CRE, ya que en ambas configuraciones la celda seleccionada es la misma que para el downlink. Mientras que la otra *Acción* se aplica si la técnica configurada es DUDe.

Con la primera opción, se escoge la misma celda que la seleccionada anteriormente por el enlace descendente, mientras que para DUDe, se emplea el vector creado en la *Acción* donde se ha calculado previamente la potencia recibida y se han registrado los índices y potencias recibidas de cada celda, ordenadas según las pérdidas de propagación, de menor a mayor. En este caso, se escoge la primera celda del vector.

En el caso de la SINR para el uplink, se parte de una SINR umbral, definida en el archivo de configuración del usuario, que se debe cumplir en la conexión, para poder así calcular la potencia que debe transmitir el usuario. En este trabajo, el valor definido para este parámetro es $SINR_{TH} = 5dB$.

4. Potencia necesaria para transmitir en el UL

En este estudio, se han analizado diferentes resultados, empleando dos métodos distintos para el cálculo de la potencia de transmisión en el uplink, de lazo abierto y de lazo cerrado.

Para el primer caso, la estimación de la potencia de transmisión necesaria, se lleva a cabo por el terminal, antes de comenzar con la transmisión. Se tiene en cuenta la compensación de pérdidas de propagación y el proceso de cálculo es rápido, aunque ofreciendo un resultado poco preciso.

En cambio, con el método de lazo cerrado, el ajuste de la potencia del terminal se establece por la estación base, en función de la calidad de la señal recibida y la deseada ($SINR_{TH}$). Se trata de un cálculo más lento que el anterior, pero con una mayor precisión.

El cálculo de la potencia necesaria para transmitir en lazo abierto, se ha realizado siguiendo la expresión 3.3 (todos los términos de esta ecuación están expresados en unidades logarítmicas).

$$P_{tx} = \min \{P_{tx_{max}}, P_0 + \alpha \cdot PL + 10 \cdot \log_{10} N_{RB}\} \quad (3.3)$$

Donde:

- $P_{tx_{max}}$ es la máxima potencia de transmisión del UE (fijada a $-6dBw$ en este trabajo)
- PL son las pérdidas por propagación (incluyendo la ganancia de las antenas y la pérdida de trayecto).
- α es el factor de compensación de pérdidas de propagación. α puede tomar los valores $\{0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$. Cuando $\alpha \neq 1$, recibe el nombre de *Fractional Power Control* (FPC).
- P_0 es un parámetro de potencia nominal. Este valor, sumado a $\alpha \cdot PL$, es el nivel de potencia establecido como objetivo en lazo abierto.

- $10 \cdot \log_{10} N_{RB}$ es un factor de corrección por el ancho de banda utilizado, donde N_{RB} , es el número de bloques de recursos físicos asignados al UE por el eNB.

De esta forma, obteniendo el número N_{RB} de resource blocks en el uplink a partir de la ecuación 3.2 y el valor de P_0 en función de la $SINR_{TH}$, como $P_0 = SINR_{TH} + 10 \cdot \log_{10}(K \cdot T \cdot Bw_{Rb})$, se determina la potencia de transmisión en lazo abierto.

En el caso del método de lazo cerrado, la expresión es la misma, pero añadiéndole el término de compensación dinámica, $CD = \Delta_{TF} + f(\Delta_{TPC})$, como se ve en la ecuación 3.4.

$$P_{tx} = \min \{P_{tx_{max}}, P_0 + \alpha \cdot PL + 10 \cdot \log_{10} N_{RB} + CD\} \quad (3.4)$$

Para calcular ese valor de compensación dinámica CD , y saber cuanto ha de variar la potencia del usuario en función de la señal recibida y la deseada ($SINR_{TH}$), se plantea el siguiente desarrollo de ecuaciones, llegando a la ecuación 3.8.

$$SINR_{Th} \leq P_{tx} - L - Inter - N_0 = P_0 + 10 \cdot \log N_{RB} + (\alpha - 1) \cdot L + CD - Inter - N_0 \quad (3.5)$$

Siendo:

- $P_{tx} = P_0 \cdot L^\alpha \cdot N_{RB} \cdot CD$
- L , las pérdidas de propagación
- $Inter$, Interferencia

Se expresa la inecuación anterior de forma lineal, se reagrupan términos, teniendo en cuenta que el ruido y la interferencia son por resource block y siendo M el conjunto de usuarios que se desea analizar, con lo que queda la siguiente expresión:

$$SINR_{TH_m} \leq \frac{P_0 \cdot \frac{L_m^\alpha}{L_m} \cdot CD}{N + Inter} \quad (3.6)$$

El término *Inter*, es la suma de las interferencias que recibe la estación base a la que el usuario quiere conectarse, del resto de usuarios conectados a otras estaciones. Teniendo en cuenta un conjunto de M usuarios, formado por el usuario a analizar (x) y un grupo de usuarios interferentes en el uplink (I), el término *Inter* queda definido como se expresa en la Ecuación 3.7. La señal (interferencia) que reciba dicha estación de los usuarios interferentes, dependerá de la potencia P_0 con la que transmite cada uno de ellos, del factor de pérdidas de compensación (ganancia), L_i , del factor CD por el que se ajusta la potencia transmitida de los usuarios, y de las pérdidas de propagación entre el usuarios interferente (i) y la estación base que esté sirviendo al usuario analizado en cuestión (x), L_{ix} .

$$Inter = \sum_I P_0 \cdot \frac{L_i^\alpha}{L_{ix}} \cdot CD_i \quad (3.7)$$

De esta forma se llega a la expresión 3.8 para un usuario x , perteneciente al conjunto de M usuarios que se despliegan en el escenario, teniendo en cuenta los I usuarios interferentes:

$$SINR_{TH_x} \leq \frac{P_0 \cdot \frac{L_x^\alpha}{L_x} \cdot CD_x}{N + \sum_i^I P_0 \cdot \frac{L_i^\alpha}{L_{ix}} \cdot CD_i} \quad (3.8)$$

En este método, calcular la potencia que debe transmitir cada usuario para cumplir la $SINR_{TH}$ ya no resulta tan sencillo como en el modelo anterior, pues en este caso, hay que saber la potencia con la que transmiten el resto y viceversa. Sin embargo, partiendo de la ecuación 3.8 se puede plantear un sistema lineal de ecuaciones, que permite determinar la potencia transmitida. De esta forma, para simplificar las expresiones, se nombra como y al término:

$y_m = P_0 \cdot L_m^\alpha \cdot CD_m$ (siendo m cada uno de los usuarios analizados), quedando la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_m^M y_m \\ \text{s.t.} \quad & y_x + \sum_{j \in M | j \neq x} y_j \beta_{jx} \geq \delta_x \forall x \in M \\ & 0 \leq y \end{aligned}$$

Donde

$$\begin{aligned} \beta_{jx} &= -SINR_x \frac{L_x}{L_{jx}} \\ \delta_x &= SINR_{TH_x} \frac{N}{L_x} \end{aligned}$$

En el sistema de ecuaciones, lo que se pretende es minimizar la suma de potencias transmitidas, y , sujeto a cumplir la $SINR_{TH}$ en cada usuario y respetando que el valor de cada una de las potencias transmitidas, no puede ser menor de P_0 . No se ha aplicado una restricción superior para el valor máximo de y , para poder realizar un análisis más completo de la potencia transmitida en cada una de las técnicas, como se comentará más adelante en el Capítulo 4.

En la Figura 3.6, se representa un pequeño escenario con el usuario x a analizar, conectado a la BS_x . Sobre esta conexión interfieren en el enlace ascendente, la potencia que recibe BS_x de los usuarios interferentes I_1 e I_2 , cuyos valores de pérdidas de propagación L_{ix} , con los que se realiza el cálculo de la interferencia son L_{1BS_x} y L_{2BS_x} respectivamente.

En este trabajo, las simulaciones se han realizado desplegando un número de hasta 300 usuarios simultáneamente. Para resolver el problema lineal planteado, en estos casos, se hace uso de la librería *GLPK* (GNU Linear Programming Kit) de *Ansi C*. Se trata de un conjunto de rutinas escritas en el lenguaje de programación ANSI

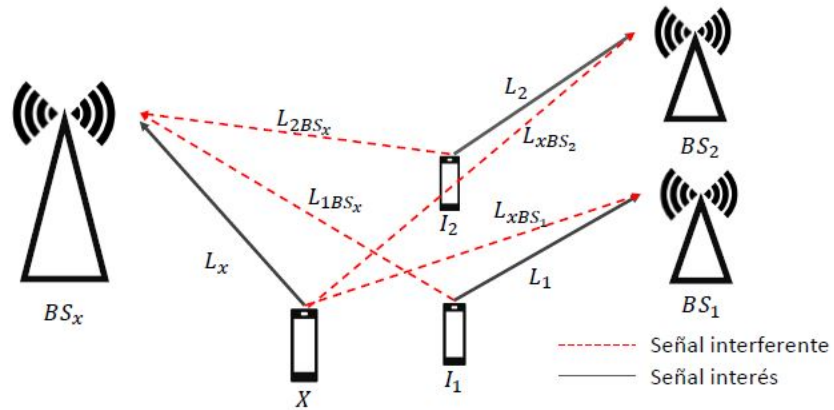


Figura 3.6: Escenario con dos usuarios interferentes

C, que está pensado para resolver programación de tipo lineal (LP) o de tipo entero mixto (MIP), y otros problemas relacionados.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo van a analizarse los resultados de las distintas simulaciones realizadas, detallando tanto las métricas utilizadas, como los escenarios empleados. Este apartado se ha dividido en tres fases: una primera de validación de la implementación, otra del análisis del modelo de interferencia para las distintas técnicas acceso, y un tercer análisis en el que se tiene en cuenta los servicios cursados por los usuarios.

4.1. Validación de la implementación

Antes de analizar el comportamiento de los servicios y de la interferencia para las diferentes técnicas de acceso, se realiza un breve análisis de un escenario sintético y sencillo, para verificar el correcto funcionamiento de la implementación llevada a cabo en la herramienta, centrándose en la mejora en términos de potencia y por tanto, en recursos, en el enlace ascendente, al aplicar diferentes políticas.

En dicho escenario, se despliega una estación base de cada tipo, macro y small, con una separación de 1000 m entre ellas, como se observa en la Figura 4.1. Se asume que un usuario se irá desplazando en línea recta entre ambos elementos de acceso, para ser analizado en diferentes puntos de la trayectoria, caracterizando así, la potencia necesaria en el uplink en función de la posición en la que se encuentre.

La potencia de transmisión necesaria para que cada usuario alcance la $SINR$ objetivo, se calcula de acuerdo al modelo de control de potencia en lazo abierto visto en el anterior capítulo (sección 3.2.1), con la expresión

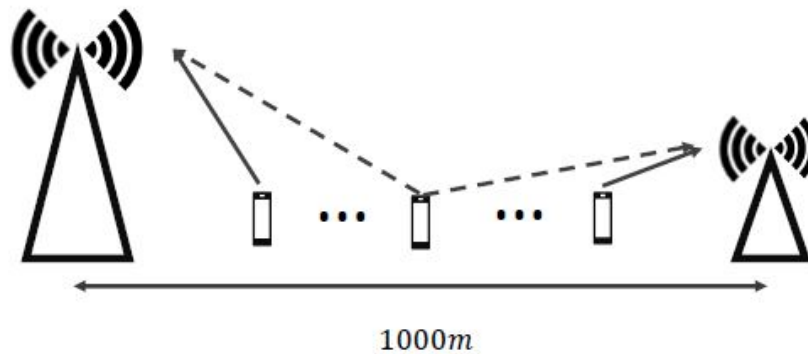


Figura 4.1: Escenario desplegado para validación de la herramienta

3.3. En este caso, se ha fijado el valor del factor de compensación de pérdidas a $\alpha = 0.4$ y los parámetros $P_{tx_{max}}$ y P_0 toman valores de 24 y $-80dBm$, respectivamente.

La Figura 4.2 muestra la potencia de transmisión en función de la distancia a la estación base macro. Cada punto representa el promedio de 1000 experimentos independientes, en los que se han podido dar situaciones de conexión con cualquiera de las dos estaciones base, así como los percentiles 10 y 90 de dicha potencia de transmisión. Además, se indica el punto en el que con mayor probabilidad se cambia de estación base.

Como muestra la Figura 4.2, el uso de técnicas CRE supone una notable ventaja en lo que se refiere al uso de la small-cell, de forma que cuanto mayor es el valor del bias, el traspaso de la macro a la small-cell ocurre antes. Además, se puede observar que el uso de DUDE aporta una mejora sustancial respecto a las otras alternativas, comprobándose que la variación de la potencia transmitida se suaviza, sin apreciarse de manera clara el salto originado por el traspaso entre estaciones base.

Tras este pequeño análisis, se ha procedido al estudio del rendimiento global de las diferentes técnicas, utilizando un escenario más complejo, descrito en la Tabla 4.1, donde se indica la topología del despliegue y los modelos de propagación implementados, que son los definidos en las recomendaciones del 3GPP. Se contemplan 7 celdas, desplegadas siguiendo un patrón hexagonal, y un número variable de small-cells en

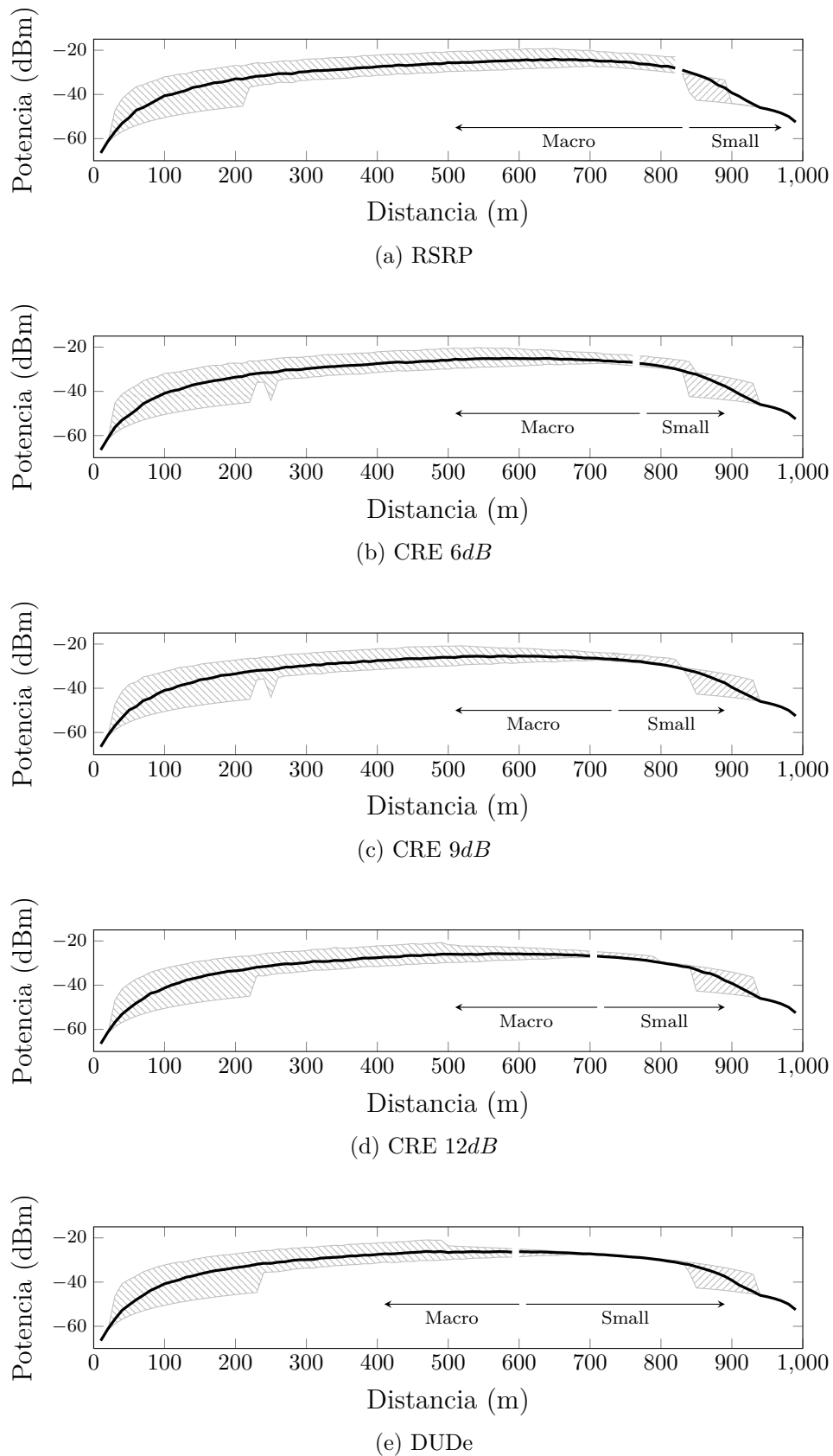


Figura 4.2: Potencia media de transmisión en el enlace ascendente a diferentes distancias de las estaciones base. La superficie sombreada delimita los percentiles del 10 y 90 %

Cuadro 4.1: Configuración para la simulación

despliegue LTE	FDD 2x20 MHz @2.1 GHz
Capa Macro	ISD 500 m, 7 tri-sector sites Max. tx. power 46 dBm Ganancia de antena 15dBi, 15 down-tilt
Capa Small	Despliegue aleatorio Max. potencia transmisión 37dBm Omni-antenna
UE	DL NF 7dB Rx. Gain 7dB Max. potencia transmisión
Despliegue LTE	L (dB) función de la distancia d [m]
Macro _{NLOS}	$139.1033 + 39.0864 \cdot (\log_{10}(d) - 3)$
Macro _{LOS}	$36.2995 + 22 \cdot \log_{10}(d)$ if $d \leq 328.42$ $40 \cdot \log_{10}(d) - 10.7953$ if $d \geq 328.42$
Small _{NLOS}	$145.48 + 37.5 \cdot (\log_{10}(d) - 3)$
Small _{LOS}	$103.8 + 20.9 \cdot (\log_{10}(d) - 3)$
	Probabilidad LOS función de la distancia d [m]
Macro	$P_{LOS} = \min(\frac{18}{d}, 1) \cdot (1 - e^{-\frac{d}{36}}) + e^{-\frac{d}{36}}$
Small	$P_{LOS} = 0.5 - \min(0.5, 5 \cdot e^{-\frac{156}{d}}) + \min(0.5, 5 \cdot e^{-\frac{d}{30}})$

la zona de cobertura de la macro-cell central, que es el área en el que se lleva a cabo el estudio. Sobre este escenario se han desplegado varios usuarios, y se han aplicado las diferentes técnicas de selección: (1) RSRP, (2) técnicas CRE con diferentes valores de bias, y (3) DUDE. Como se ha comentado anteriormente, este análisis se centra en el efecto que tienen las diferentes soluciones de selección de acceso sobre la potencia de transmisión necesaria en el enlace ascendente. Para ello se ha asumido que todos los usuarios requieren un valor de SINR fijo de 5 dB, y se ha considerado que el sistema se encuentra en condiciones de saturación.

Bajo la zona de cobertura de cada una de las macro-cell se ha desplegado un número creciente de small-cells, y se ha evaluado el comportamiento global de 6000 conexiones. La Figura 4.3 muestra la potencia media transmitida por cada una de las asociaciones, usando las diferentes soluciones de selección de acceso, y para diferentes densidades de small-cells.

Como se puede observar, al incrementar la presencia de small-cells se reduce notablemente la potencia necesaria para transmitir, siendo menos

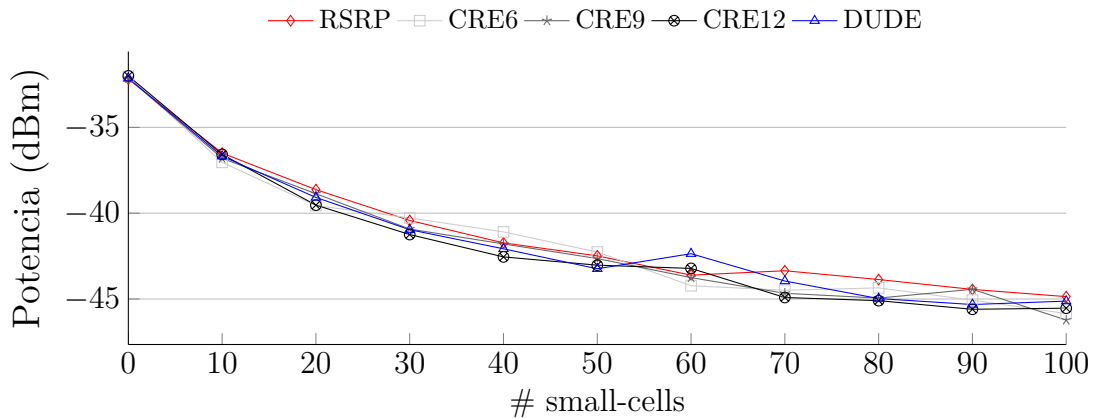


Figura 4.3: Potencia media de transmisión ante diferente número de small-cells desplegadas

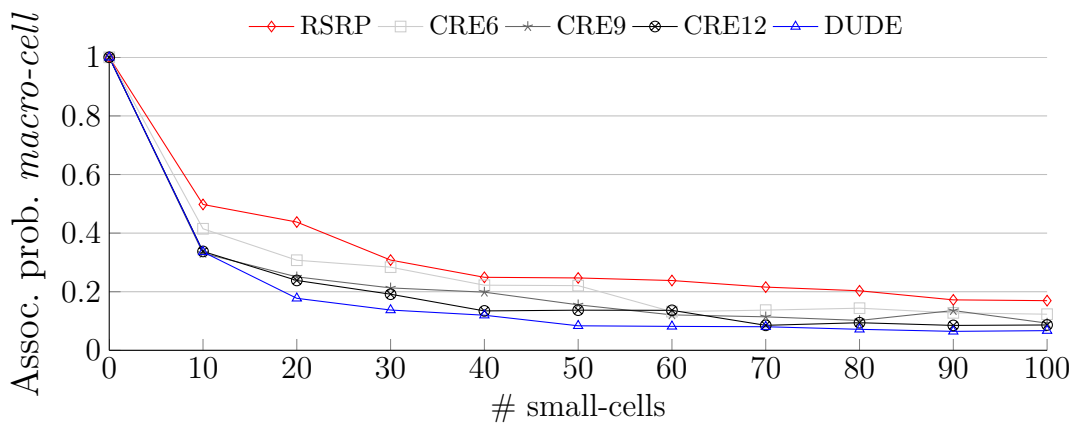


Figura 4.4: Probabilidad media de asociación con la macro-cell. El eje de abscisas indica el número de small-cells desplegadas

relevante el impacto de las diferentes soluciones de selección de acceso.

Además, la Figura 4.3 presenta la probabilidad de realizar una asociación con una macro-cell ante diferentes densidades de small-cells. En este caso, sí se puede observar una diferencia notable para las diferentes técnicas de acceso utilizadas, de forma que DUDE consigue incrementar considerablemente las conexiones con las small-cells, que incluso se llegan a duplicar, si se comparan con RSRP. Como es de esperar, esta diferencia se va reduciendo a medida que la densidad de small-cells aumenta.

Cuadro 4.2: Configuración del escenario para análisis de interferencia

Características escenario	
Usuarios	100
Small-cells	Desde 0 hasta 60 (con paso 20)
Iteraciones	1
Repeticiones	100
Intención	Siempre a 1

4.2. Análisis del modelo de interferencia

La segunda fase de este trabajo, tras validar el correcto funcionamiento de la herramienta, consiste en un análisis del modelo de interferencia para el enlace ascendente, en función de las diferentes densidades de small-cells desplegadas en el escenario.

Para ello, se estudia el caso en el que los usuarios (100 para este análisis) son desplegados aleatoriamente en un escenario de $1000 \times 1000m^2$, en el que la estación base macro se fija en el centro (punto (500, 500)) y las small-cell se reparten de forma aleatoria por todo el cuadrado.

Se realizan 100 experimentos independientes, en los que cada usuario es analizado durante una sola fotografía, es decir una única iteración, desplegando un número distinto de small-cells (desde 0 hasta 60 con un incremento de 20). Además, para este estudio, se supone la intención del usuario siempre a 1, es decir, el usuario siempre va a querer cursar el servicio, ya que en este caso el análisis no se centra en los servicios cursados, sino en la potencia necesaria para transmitir, cumpliendo una *SINR* objetivo y la interferencia que afecta al enlace ascendente con las distintas densidades de small-cell desplegadas. En la tabla 4.2, se resumen las características del escenario empleado en este grupo de simulaciones.

En este caso, ya no se supone que las estaciones base están totalmente cargadas, de forma que se tiene en cuenta un valor de interferencia que varía, dependiendo del número de estaciones desplegadas y de la técnica empleada. Por tanto, en esta fase, con el escenario descrito, el análisis se realiza en dos situaciones diferentes. Por un lado, se calcula la potencia transmitida teniendo en cuenta la interferencia mutua que se generan entre sí todos los usuarios desplegados y, por otro lado, se realiza el

estudio empleando para cada densidad de small-cells y cada técnica de acceso, un valor de interferencia constante, obtenido a partir de la primera configuración.

En el primer caso, se establece la potencia transmitida, a partir del método de lazo cerrado descrito en el capítulo anterior (al contrario que en la fase de validación de la herramienta) con la ecuación 3.8, mediante la librería *GLPK*. En este caso la interferencia es considerada como la potencia total que recibe la estación base a la que el usuario bajo análisis se está conectando, por el resto de usuarios del escenario, conectados a una estación base distinta. Hay que tener en cuenta que el factor de reuso de frecuencia es 1 en la tecnología 4G, y un usuario conectado a la misma estación base, no está interfiriendo en la conexión. Tampoco se consideran como interferentes aquellos usuarios, cuyo valor de pérdidas de propagación sea mayor de un valor máximo establecido.

Además, en un principio, se definió un valor máximo de potencia transmitida por el usuario de $-6dBw$, aplicando este valor como límite superior en el sistema de ecuaciones planteado a resolver mediante *glpk*. Sin embargo, con el objetivo de analizar en mayor profundidad y de forma más precisa, el valor de potencia necesario para transmitir en el uplink, el cálculo se realiza sin imponer restricciones en la potencia máxima que puede transmitir el usuario.

De esta manera, en la Figura 4.5, puede observarse la función de densidad de probabilidad estimada (PDF) para la potencia transmitida, teniendo en cuenta configuraciones de small-cells diferentes.

Si se analiza la Figura 4.5, se ve claramente que en todas las técnicas, la probabilidad de transmitir a una menor potencia, se da cuando no hay ninguna small-cell desplegada en el escenario. Esto es debido a que cuando sólo se encuentra la estación base macro desplegada en el escenario, no hay ninguna otra estación que le esté interfiriendo. Sin embargo, al realizar un despliegue de más estaciones, se produce un incremento de interferencia, haciendo que el usuario tenga que aumentar la potencia de transmisión para combatir dicha interferencia, y poder lograr la *SINR* objetivo.

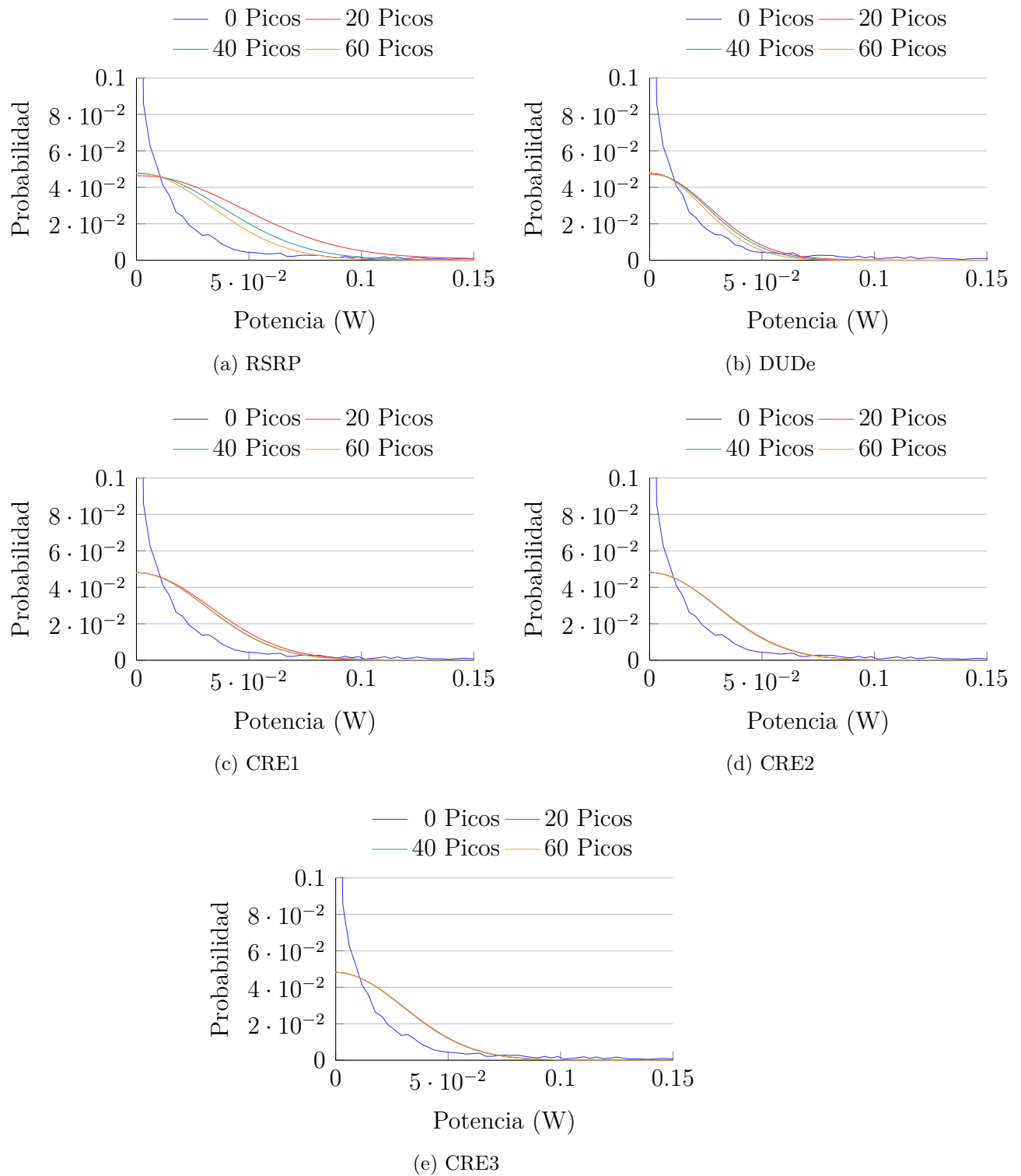


Figura 4.5: PDF de la transmisión de potencia usando modelo de interferencia mutua

En la misma figura, se observa, que aunque al desplegar más de una estación base en el escenario, la potencia necesaria aumenta, ésta se reduce a medida que el número de small-cells sigue creciendo. Lo cual indica que llega un punto en el que la interferencia se compensa, debido a la cercanía del usuario a las estaciones, reduciéndose la potencia necesaria a transmitir. Este caso se puede ver de forma más clara en el caso de RSRP, mientras que para las técnicas DUDe y CRE, al incrementar la utilización de las small-cell, la variación de la potencia al variar la densidad de celdas es más suave.

Además, haciendo una comparativa entre las distintas técnicas de acceso, se puede apreciar como en RSRP, es necesario una mayor potencia de transmisión que para DUDe. En el caso de DUDe y CRE, con un análisis basado exclusivamente en los resultados de la Figura 4.5, podría deducirse que la potencia necesaria para transmitir es similar. Sin embargo, es necesario tener en cuenta el número de conexiones establecidas en cada situación. En el caso de de RSRP y DUDe, el porcentaje de conexiones activas es el mismo, sin embargo el porcentaje para CRE es bastante menor, puesto que al forzar al usuario a conectarse a las small-cells con un bias, es probable que las pérdidas de propagación sean demasiado grandes y el canal de control se podría perder. Por tanto, las conexiones que se han llegado a establecer en este caso son las que tienen las mejores condiciones, obteniendo los mismos resultados de potencia que con DUDe, pero con un número de usuarios servidos mucho menor. Durante este apartado no se entra más en detalle en el cálculo de conexiones establecidas, ya que en el siguiente análisis se centra en los servicios cursados por el usuario.

Empleando el mismo escenario, se ha obtenido también la función de densidad de probabilidad, de la interferencia. En la Figura 4.6, se representa la PDF para el caso de la técnica DUDe.

Se observa que, para mayores densidades de small-cells desplegadas, hay una mayor probabilidad de obtener una interferencia menor, aumentando a medida que se incrementa el número de small-cells. Esto es debido a que los usuarios transmiten con una menor potencia en los casos de una mayor densidad de picos (como se ha visto en la Figura 4.5), reduciéndose así también, la interferencia generada en el resto de estaciones base. En este caso no aparece ningún valor para 0 picos, ya que la interferencia es nula, puesto que todas las estaciones se están conectando a la macro-cell.

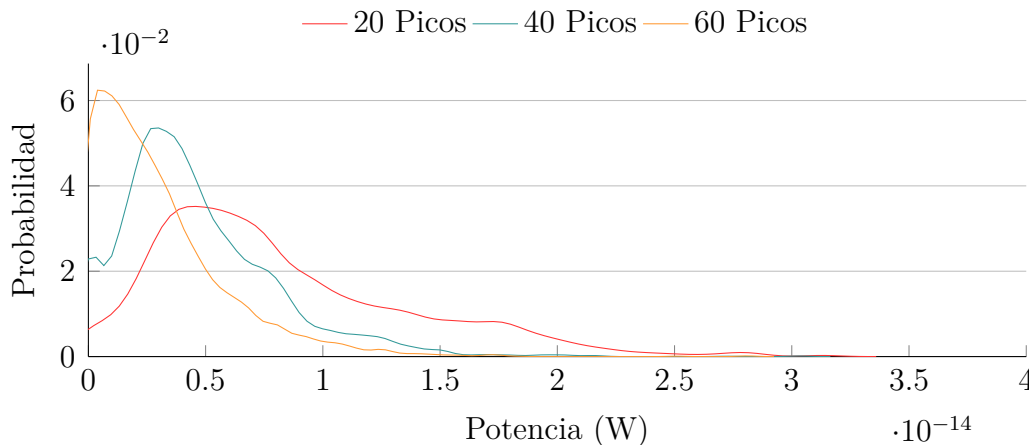


Figura 4.6: PDF de la interferencia usando modelo de interferencia mutua para DUDe

Las gráficas con los valores de interferencia para el resto de técnicas se encuentran incluida en el anexo del documento.

Una vez analizado el comportamiento de la interferencia mutua generada en cada experimento, se procede al análisis de la potencia transmitida, considerando una interferencia constante. De esta forma, se utiliza el valor medio de la interferencia obtenida para cada una de las configuraciones empleadas (según número de estaciones pico desplegadas y técnica de acceso empleada). En la Figura 4.7 se muestra el comportamiento de la potencia transmitida, con un valor de interferencia constante, para cada despliegue de small-cells.

Al comparar las Figuras 4.5 y 4.7, se observa como en el caso de la segunda la potencia necesaria para transmitir es casi 10 veces mayor que al utilizar el modelo de interferencia mutua. Esto quiere decir que, con los mismos valores de interferencia media, los modelos tienen un comportamiento diferente, puesto que en el último caso analizado, no se tienen en cuenta las condiciones específicas de cada escenario, atribuyendo la misma cantidad de interferencia a un usuario que se encuentra muy cerca de la estación base y que, por tanto, tiene unas buenas condiciones y puede asumir una mayor interferencia para cumplir el requisito de SINR, que a un usuario a una mayor distancia, al que un aumento en el valor de la interferencia le penaliza mucho más, con lo que podría no cumplir la SINR objetivo. Sin embargo, el caso contrario no sucede, por eso, a mismos valores medios de interferencia, los resultados de potencia necesaria para el enlace ascendente son muy superiores al suponer la

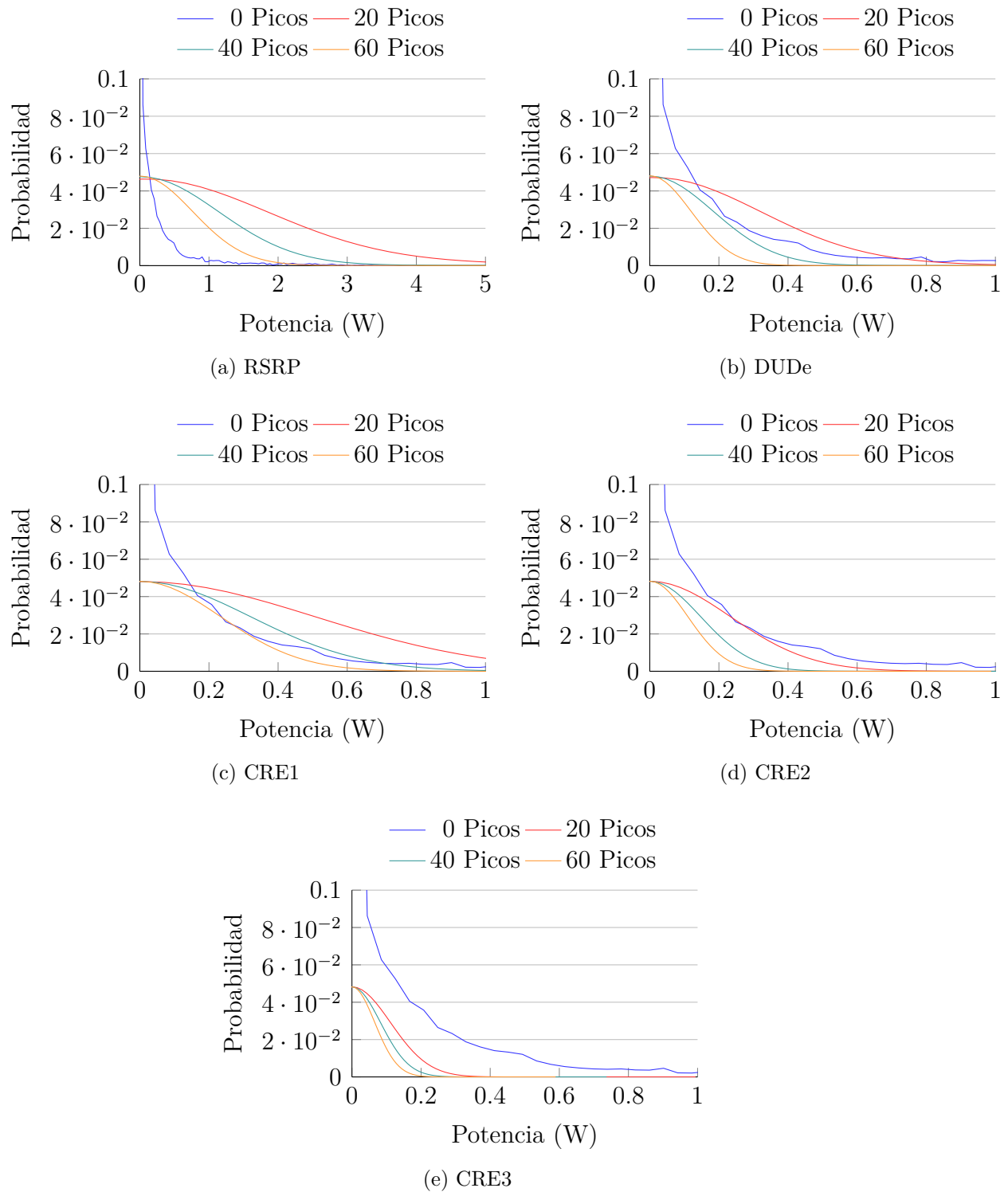


Figura 4.7: PDF de la transmisión de potencia usando modelo de interferencia constante

interferencia constante. Estos se produce independientemente de la técnica de acceso empleada. En todos los casos la potencia necesaria es bastante superior a la del modelo de interferencia mutua.

Además, en el caso de RSRP, al igual que con el anterior modelo, la cantidad de potencia necesaria para transmitir es mucho mayor que en el resto de casos. Analizando los resultados de CRE, se observa que la potencia necesaria es menor que en DUDe, pero al igual que se vio antes, el porcentaje de conexiones activas es sensiblemente menor, conectándose sólo aquellos usuarios cuyas condiciones son adecuadas.

4.3. Análisis del comportamiento de los servicios

La última fase del trabajo consiste en el análisis del comportamiento de los servicios cursados por los usuarios, atendiendo a las diferentes técnicas empleadas, así como el estudio del número de traspasos necesarios en el escenario desplegado.

El escenario, al igual que en la fase previa, es un cuadrado de $1000 \times 1000(m)$, en el que la estación base macro se encuentra situada en el centro $(500, 500)$. En este caso, las small-cell están situadas de forma aleatoria entre dos coronas de radio 300 y $750m$, centradas en la estación base macro. A su vez, los usuarios se despliegan también aleatoriamente, pero en un cuadrado de $500 \times 500(m)$ con centro en la macro.

Además, otra diferencia a tener en cuenta con el escenario anterior, es que la intención del usuario no es 1 de forma constante, sino que varía a lo largo de las 360 iteraciones en las que se evalúa a cada usuario, a medida que se desplazan por el escenario con una velocidad peatonal ($6Km/hora$). En esta etapa, se han desplegado un número diferente de small-cells, desde 0 hasta 60, con paso 20. El modelo de interferencia empleado, es el de interferencia mutua, ya que como se ha comentado anteriormente, es más preciso, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada usuario.

Cuadro 4.3: Configuración del escenario para análisis de servicios

Características escenario	
Usuarios	100 (movilidad $6Km/h$)
Small-cells	Desde 0 hasta 60 (con paso 20)
Iteraciones	360
Repeticiones	10
Intención	Varía según lo de- finido en la traza

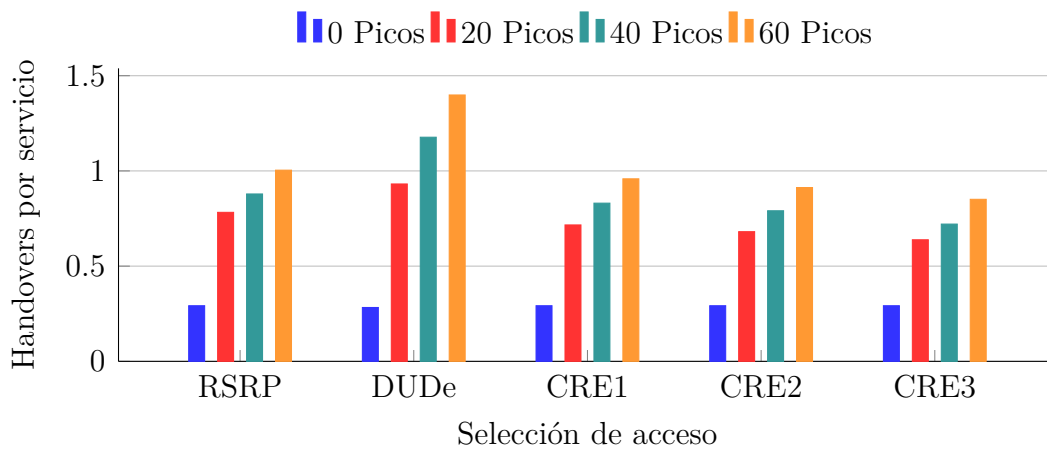


Figura 4.8: Número de traspasos por servicio

En la Tabla 4.3 se encuentran resumidas las características del escenario analizado en esta fase.

La primera métrica analizada es el número de traspasos que se dan por servicio cursado. En la Figura 4.8, se representa esta cantidad, como la suma de traspasos por servicio cursado que se ha dado para los 100 usuarios desplegados durante las 360 iteraciones, para cada una de las técnicas de acceso empleadas y para cada valor de densidad de small-cells.

En la Figura 4.8 se aprecia como independientemente de la técnica de acceso empleada, el número de traspasos aumenta a medida que lo hace el número de small-cells desplegadas, reflejando que el usuario tiene más posibilidades de entrar en áreas de cobertura de un mayor número de estaciones diferentes. Los traspasos analizados en el trabajo son entre celdas, dándose traspasos horizontales (entre la misma capa) y verticales

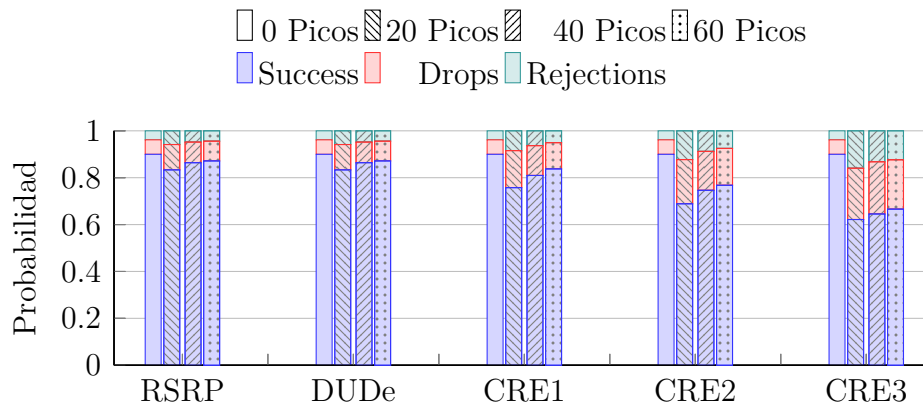


Figura 4.9: Estadísticas de servicios

(entre distintas capas), por esta razón en la figura se reflejan traspasos incluso cuando sólo hay una estación base desplegada, puesto que se trata de traspasos horizontales entre sectores de una misma estación base. Este número es constante en todas las técnicas, ya que cuando sólo hay una estación desplegada, todas tienen el mismo comportamiento.

Otro aspecto a destacar de estos resultados es que, analizando la diferencia entre las técnicas empleadas, el mayor número de traspasos se da en el caso de DUDe, debido a que mientras en el resto de técnicas los usuarios están forzados a conectarse a una estación en concreto, con DUDe se dispone de una mayor libertad para cambiar a una estación que pueda ofrecer una mejora en las condiciones de conexión.

También se ha analizado, para cada una de las configuraciones descritas, la cantidad de servicios que han finalizado de forma exitosa, los que han sido rechazados, es decir, que no han llegado a cursarse y los tirados, aquellos que han empezado a cursarse, pero no han podido finalizar. En estos dos últimos casos, los servicios han sido descartados por el enlace descendente, para aquellos casos en los que la SINR no superaba los $-3dB$.

Estas métricas, cuyos resultados se reflejan en la Figura 4.9, han sido calculados mediante la máquina de estados implementada en la herramienta, descrita en el apartado 3.2 del capítulo anterior.

Comenzando la comparativa entre las distintas técnicas, en la Figura 4.9 se aprecia como en el caso de RSRP y DUDe, el valor de los servicios

cursados y finalizados correctamente es bastante parecido. Sin embargo, en el caso de CRE, este parámetro disminuye, y de manera correlada al valor de bias. Esto es debido principalmente a que al estar forzando a un servicio a conectarse a una small-cell, aunque pudiera tener mejores condiciones para la macro, existen mayores probabilidades de que la SINR necesaria para establecer la conexión no supere el valor umbral, perdiendo de esta forma, el canal de control antes que en las otras técnicas de acceso.

Analizando los resultados con distinta densidad de picos, se observa como para el caso en el que hay 0 picos, se cursa un mayor número de servicios, debido a que, como se ha comentado, los servicios son descartados por una *SINR* umbral en el enlace descendente y, como se ha visto anteriormente, la interferencia es menor con esta configuración, produciéndose una mayor SINR y una menor probabilidad de descartar servicios. Así, el número de servicios cursados aumenta con una mayor densidad de small-cells desplegadas.

Por esa misma razón, si se observa esta última Figura, el número de servicios rechazados disminuye al aumentar las small-cells desplegadas, al igual que el de servicios tirados, manteniéndose un valor constante en todas las técnicas para el caso de 0 small-cells desplegadas.

Además, siguiendo con la misma teoría en cuanto a diferencias entre técnicas, es en el caso de CRE en el que se da un mayor número de servicios tanto rechazados como tirados, al perder el canal de control del enlace descendente.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante este capítulo se comentarán las conclusiones alcanzadas tras el estudio y análisis de los resultados obtenidos a lo largo del trabajo.

Como se ha expuesto anteriormente, el proyecto ha sido realizado en tres etapas distintas. Una primera, de validación de la herramienta empleada, en la que mediante el despliegue de un escenario reducido, se ha hecho un análisis de potencia de transmisión necesaria en el enlace ascendente para las tres estrategias de selección de acceso estudiadas, RSRP, CRE y DUDe.

Se ha concluído que, mediante el uso de CRE, la conexión a las small-cell tiene lugar mucho antes que con la técnica RSRP, dando lugar a un aumento en el número de conexiones de los usuarios a las small-cell. Este aumento se ha observado también con el empleo de DUDe, consiguiendo además con esta técnica un mayor número de conexiones a small-cells, y una mejora respecto a la potencia, en comparación con las otras dos soluciones. Además, en esta primera fase, se observa como para un valor de interferencia constante, en el que las estaciones se suponen totalmete cargadas, la potencia disminuye a medida que aumenta el número de small-cells desplegadas.

Estos resultados coinciden con los esperados, lo que permite validar la metodología de análisis con la herramienta empleada.

Durante la segunda etapa, el estudio se ha centrado en la interferencia del sistema en el enlace ascendente. Se ha visto que, cuanto mayor es el

número de small-cells desplegadas, menor es la interferencia que afecta a las conexiones, debido a la reducción de potencia que se da en el enlace descendente. Se concluye además, que mediante el empleo de DUDe, la potencia de transmisión es mucho menor que en el caso de RSRP, para un mismo porcentaje de servicios cursados, mientras que empleando CRE, aunque se consigue reducir la potencia transmitida del sistema, se obtienen peores prestaciones, pues se cursa un menor número de servicios.

Con este análisis se ha deducido también, al comparar el modelo de interferencia mutua con otro de interferencia constante, que para mismos valores de interferencia media, la potencia necesaria de transmisión observada en el primer caso es mucho menor y más precisa, pues se tienen en cuenta las condiciones de todos los usuarios.

En la tercera fase del trabajo, se ha hecho una comparativa de los servicios para las distintas técnicas empleadas, poniéndose de manifiesto que la potencia empleada en DUDe es, bastante menor que en RSRP, pero el número de servicios cursados es prácticamente el mismo. Por su parte, los servicios rechazados y tirados son más relevantes en el caso de CRE. Es importante también destacar que al utilizar DUDe, el número de traspasos realizado es bastante mayor, especialmente a medida que aumentan las small-cell desplegadas.

Finalmente, puede concluirse que mediante el empleo de técnicas como CRE y DUDe en redes heterogéneas, se consigue un mayor uso de small-cells que con RSRP y que con DUDe se obtiene una reducción bastante significativa en la potencia de transmisión respecto a RSRP, manteniendo las mismas prestaciones. Sin embargo, esta técnica presenta como desventaja un mayor número de traspasos.

Como se ha comentado a lo largo de la memoria, el objetivo de este trabajo era comparar diferentes escenarios en igualdad de condiciones, de forma cualitativa. Además, se podrían presentar como líneas futuras, el estudio de estas selecciones de acceso en diversos escenarios, en los que se empleen combinadas, junto a otro tipo de técnicas propuestas por el 3GPP, como por ejemplo CoMP, que ayuden a aumentar la eficiencia y proveer unas mejores prestaciones al usuario.

Anexos

Anexos A

PDF Interferencia mutua

A continuación, se muestran las gráficas con las funciones de densidad de probabilidad de la interferencia, a partir de los resultados obtenidos en el análisis de modelo de interferencia para las técnicas RSRP y CRE.

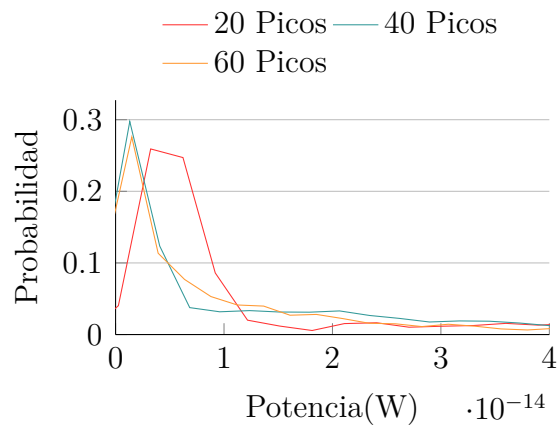


Figura A.1: PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (RSRP)

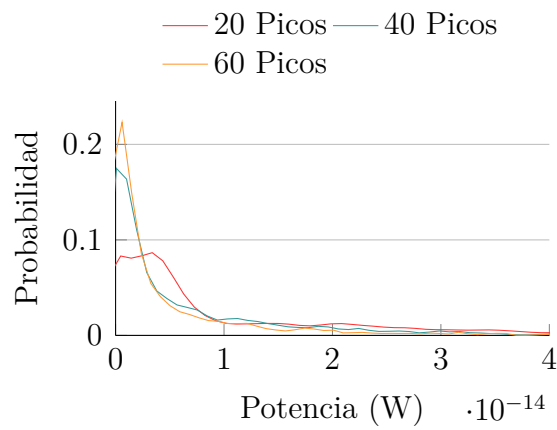


Figura A.2: PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE1)

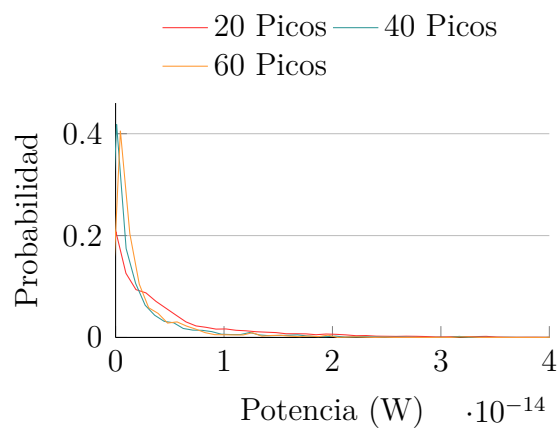


Figura A.3: PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE2)

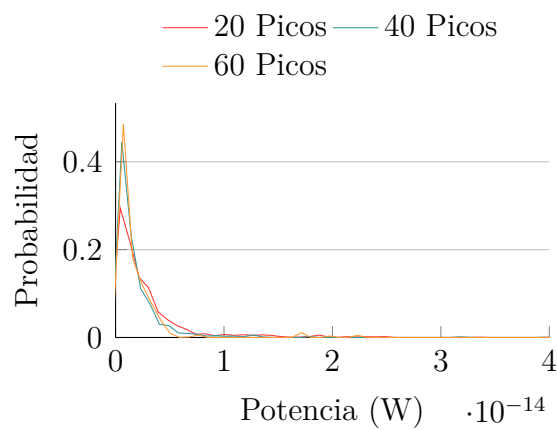


Figura A.4: PDF de la interferencia para el modelo de interferencia mutua (CRE3)

Bibliografía

- [1] Varios autores, *About3gpphome*. url <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about3gpp>, 2015
- [2] Narcís Carmona, Juan José olmos, Mario García, José f.Monserrat, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*. ISBN-10: 8426717101, 2011.
- [3] Zakrzewska,A,; Ruepp,S.; Berger,M.S *Towards converged 5G mobile networks-challenges and current trends* , 2014.
- [4] Varios autores *OpenSignal Reports* , 2017.
Dirección URL: <https://opensignal.com/reports/>
- [5] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, *34G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*.
- [6] S. B. Lande, Jyoti D. Gawali, S.M Kharad, *Performance Evolution of SC-FDMA for Mobile Communication System* , 2015
- [7] Navita, Amandeep, *PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDMA, MIMO AND SC-FDMA TECHNOLOGY IN 4G LTE NETWORKS* , 2016
- [8] JNadia Awad, Is-Haka Mkwawa , *The Impact of the Reference Signal Received Power to Quality of Experience for Video Streaming over LTE Network*, 2017.
- [9] Jun Wang, Jianguo Liu, Dongyao Wang, Jiyong Pang, and Gang Shen, *Optimized Fairness Cell Selection for 3GPP LTE-A Macro-Pico HetNets*, 2011.
- [10] Hisham Elshaer, Federico Boccardi, Mischa Dohler and Ralf Irmer, *Downlink and Uplink Decoupling: a Disruptive Architectural Design for 5G Networks*, 2014.

- [11] Federico Boccardi, Jeffrey Andrews, Hisham Elshaer, Mischa Dohler, Stefan Parkvall, Petar Popovski, and Sarabjot Singh *Why to Decouple the Uplink and Downlink in Cellular Networks and How To Do It*, 2016.
- [12] Luis Fernando Pedraza, César Hernández, Dora María Ballesteros *Modelo de desvanecimiento selectivo en frecuencia*, 2012.