

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**MODELADO Y ANÁLISIS DEL ENLACE DE
SUBIDA EN REDES HETEROGÉNEAS LTE**
(Uplink modeling and analysis in LTE HetNets)

Para acceder al Título de

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

Autor: Claudia Serrano Martínez

JULIO -2018



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

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Claudia Serrano Martínez

Director del TFG: Ramón Agüero Calvo

Título: “Modelado y análisis del enlace de subida en redes heterogéneas LTE”

Title: “Uplink modeling and analysis in LTE HetNets”

Presentado a examen el día: 23 de Julio de 2018

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Tomás Fernández Ibáñez

Secretario (Apellidos, Nombre): Alberto Eloy García Gutiérrez

Vocal (Apellidos, Nombre): Ramón Agüero Calvo

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

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

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi tutor, Ramón Agüero Calvo, por su confianza y apoyo a lo largo de estos meses y, a Luis Díez, por sus consejos y su ayuda. Gracias a ellos, ha sido posible realizar este trabajo.

Y, por último, a mi familia, especialmente a mis padres, por apoyarme cada día durante estos cinco años y por brindarme, en los momentos malos, la fuerza que necesitaba para continuar. Sin ellos no hubiese sido posible estudiar este grado.

RESUMEN

En los últimos años, la demanda de tráfico por parte de los usuarios a través de redes celulares ha aumentado notablemente. Sin embargo, todavía hay zonas donde los servicios de banda ancha no llegan adecuadamente o su presencia es inexistente, por lo que se plantea la necesidad de crear nuevas tecnologías y topologías de red que permitan garantizar la demanda de datos requerida con una calidad adecuada.

Como resultado surgen las redes heterogéneas (*HetNets*) compuestas por diferentes tamaños de celdas y, que permiten mejorar la cobertura de red. Con el objetivo de obtener un mayor rendimiento, aparecen nuevas técnicas de selección de acceso como CRE (*Cell Range Expansion*) y DUDe (*Down-link/Uplink decoupling*), frente a aquellas más tradicionales, como RSRP (*Reference Signal Received Power*).

Durante el desarrollo de la memoria, tras una breve introducción a LTE, se explicarán los conceptos básicos y funcionamiento de las diferentes técnicas de acceso y los mecanismos de control de potencia LTE. A continuación, se presentará el entorno de simulación *GWNSyM* empleado para la obtención de resultados, creado por el Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria.

Para dicho estudio se adaptará la herramienta de simulación al entorno necesario para el desarrollo de este trabajo. Se modelará el comportamiento de las diversas técnicas empleadas en diferentes escenarios LTE, para posteriormente realizar un análisis sobre el rendimiento de las redes celulares heterogéneas.

ABSTRACT

In the last years, the demand for traffic by users through cellular networks has increased significantly. Nevertheless, there are still areas where broadband services do not arrive appropriately or their presence is non-existent, so the need arises to create new technologies and network topologies that secure the required data demand with an appropriate quality.

The result is heterogeneous networks (*HetNets*) composed of different cell sizes and, that allow to improve network coverage. In order to obtain greater performance, new access selection techniques appear, like as CRE (*Cell Range Expansion*) and DUDe (*Down-link / Uplink decoupling*), in front of those more traditional, such as RSRP (*Reference Signal Received Power*).

During the development of the memory, after a brief introduction to LTE, the basic concepts and operation of the different access techniques and the LTE power control mechanisms will be explained. Next, the simulation environment that has been used to obtain results, created by the Telematics Engineering Group of the University of Cantabria, will be presented.

For this study, the simulation tool will be adapted to the environment necessary for the development of this work. The behavior of the different techniques used in different LTE scenarios will be modeled, to later analyze the performance of heterogeneous cellular networks.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.	5
1.1. Objetivo del proyecto	5
1.2. Organización de la memoria	6
2. LONG TERM EVOLUTION (LTE).	8
2.1. Evolución histórica de las comunicaciones móviles digitales	8
2.2. Redes heterogéneas (HetNets)	10
2.3. Aspectos fundamentales y funcionamiento de la tecnología LTE	10
2.3.1. Características principales de LTE	11
2.3.2. Arquitectura de red LTE.	11
2.3.3. Tecnologías de nivel físico: OFDMA, SC-FDMA	13
2.3.4. Sectorización	17
2.4. Control de potencia LTE.	18
2.4.1. Control de lazo abierto (<i>Open Loop Control</i>)	19
2.5. Técnicas de selección de acceso	19
2.5.1. RSRP (<i>Reference Signal Received Power</i>).	19
2.5.2. CRE (<i>Cell Range Expansion</i>)	20
2.5.3. DUDe (<i>Downlink/Uplink Decoupling</i>)	21
3. ENTORNO DE SIMULACIÓN	22
3.1. Introducción a la herramienta	22
3.2. Composición de la herramienta	22
3.2.1. Procedimiento general de simulación	24
3.3. Implementación de escenarios de simulación	24
3.3.1. Despliegue elementos de red	27
3.3.2. Potencia recibida en el Downlink.	27
3.3.3. Selección de celda en el Uplink.	31
3.3.4. Control de potencia	34

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
4.1. Comparativa de técnicas de selección de acceso en función del escenario	38
4.2. Comparativa de esquemas de control de potencia: sin control de potencia y control de potencia en lazo abierto (<i>Open Loop Control</i>) con diferentes valores de alpha	40
4.2.1. Técnica RSRP en redes homogéneas	40
4.2.2. Técnica CRE en redes heterogéneas	41
4.2.3. Técnica DUDe en redes heterogéneas	43
4.3. Comparativa de técnicas en escenarios heterogéneos	44
5. CONCLUSIONES	48
5.1. Líneas futuras.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Arquitectura del sistema LTE [6].	12
2.2	Técnica OFDM Y OFDMA [8].	13
2.3	Concepto de PRB [9].	15
2.5	Tecnologías de nivel físico utilizadas en un sistema LTE [11].	17
2.6	Área de cobertura de las estaciones base.	18
2.7	Técnica CRE.	20
3.1	Representación abstracta de la instancia <i>Tipo</i> dentro de GWNSyM	23
3.2	Metodología de simulación.	24
3.3	Definición de las diferentes entidades de red.	26
3.4	Instanciación elementos de red.	26
3.5	Definición de las diferentes <i>Acciones</i>	26
3.6	Ejemplo despliegue escenario.	27
3.7	Definición de distancias.	29
3.8	Acción para calcular la potencia recibida en el DL.	30
3.9	Acción para selección de celda en el UL- técnica RSRP.	32
3.10	Acción para selección de celda en el UL- técnica CRE.	33
3.11	Acción para selección de celda en el UL- técnica DUDe.	34
3.12	Función para el cálculo de la potencia de ruido.	35
3.13	Acción mecanismo de control de potencia- <i>Open Loop Control (OLPC)</i>	36
3.14	Acción mecanismo de control de potencia- <i>No Open Loop Control (NOPC)</i>	36
4.1	Carga estaciones base-red homogénea.	38
4.2	Carga estaciones base-red heterogénea. La carga se mide como porcentaje de usuarios conectados.	39
4.3	Técnica RSRP en redes homogéneas.	40
4.4	Técnica CRE en redes heterogéneas.	41

4.5	Técnica DUDe en redes heterogéneas.	43
4.6	Comportamiento de las técnicas de selección de acceso para diferentes valores de pico.	45
4.7	Carga estaciones base para diferentes valores de pico. La carga se mide como porcentaje de usuarios conectados.	47

1. INTRODUCCIÓN

El rápido aumento del uso de datos en los sistemas de comunicaciones móviles ha llevado al desarrollo de tecnologías inalámbricas de cuarta generación (4G), incluyendo LTE (*Long Term Evolution*) y WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

Actualmente, la demanda de tráfico de datos en redes móviles crece de forma continuada, lo que se debe tener en cuenta tanto para la definición de la topología de las redes, como en los procedimientos de selección de acceso. Además, con el concepto de Internet de las Cosas (*Internet of Things*), millones de dispositivos pueden tener acceso a estaciones base vecinas simultáneamente para cargar diferentes datos a su servidor. Como consecuencia, este uso creciente del ancho de banda del enlace ascendente en LTE provoca una degradación notable en el rendimiento.

En el futuro o en generaciones posteriores, las velocidades de datos y las aplicaciones utilizadas por los dispositivos móviles podrían aumentar aún más, lo que provocará un incremento notable de consumo de la batería.

Precisamente, los objetivos del control de potencia son mejorar la capacidad del sistema, la cobertura y la experiencia del usuario, mientras que al mismo tiempo se reduce el consumo de energía del usuario. Por ello, a lo largo de los años se han propuesto diferentes mecanismos de control de potencia y técnicas de selección de acceso.

En este proyecto, se estudiarán diversas estrategias con el fin de optimizar la gestión de recursos. Fundamentalmente, se hará mayor énfasis en el control de potencia del enlace ascendente ya que es una función clave de gestión de recursos en redes móviles.

1.1. Objetivo del proyecto

El control de potencia determina la calidad de servicio experimentada por el usuario, influyendo al mismo tiempo en la duración de la batería del terminal. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo será comprobar que, la utilización de las diferentes estrategias de control de potencia y mecanismos de selección de acceso en un despliegue de red LTE, aporta mejoras en el comportamiento de la red y de los usuarios.

Para abordar este objetivo, se han llevado a cabo los siguientes pasos:

- Conocer el funcionamiento y las singularidades de las redes LTE.
- Entender los conceptos básicos y funcionamiento de las diferentes técnicas de selección

de acceso y estrategias de control de potencia empleadas.

- Definir las características principales de la herramienta de simulación empleada y adaptarla al entorno necesario para el desarrollo de este trabajo.
- Obtener resultados analizando diferentes escenarios de trabajo en redes heterogéneas en igualdad de condiciones.
- Analizar el impacto que cada una de las técnicas estudiadas tiene sobre el enlace ascendente.

1.2. Organización de la memoria

En consecuencia, este trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Introducción

Incluye una breve introducción del tema sobre el que trata el proyecto, indicando el fundamento y los objetivos a alcanzar.

- Capítulo 2: Long Term Evolution (LTE)

Contiene una breve descripción de la evolución histórica de las comunicaciones móviles digitales hasta llegar a la actualidad; se explica el concepto de red heterogénea, se definen los aspectos fundamentales y funcionamiento de LTE: particularidades de la tecnología, arquitectura de red, sectorización y diseño de la capa física y se describen los principios simples de control de potencia y los diferentes mecanismos de control de potencia LTE, haciendo énfasis en aquellos que se han implementado y utilizado durante el trabajo: *No Power Control*, *Open Loop Power*. Asimismo, se describen las diferentes técnicas de selección de acceso utilizadas para el control de potencia: *RSRP (Reference Signal Received Power)*, *DUDe (Downlink/Uplink decoupling)* y *CRE (Cell Range Expansion)*.

- Capítulo 3: Entorno de simulación

Incluye una breve introducción a la herramienta, se describe cómo está compuesta la herramienta y la caracterización del entorno de simulación para el desarrollo de este trabajo (indicando las nuevas implementaciones realizadas en la herramienta para la obtención de resultados).

- Capítulo 4: Análisis de resultados:

Una vez implementado el comportamiento deseado en la herramienta, se plantean diversos escenarios y se obtienen resultados para posteriormente analizarlos.

- Capítulo 5: Conclusiones:

Se obtienen conclusiones a partir de los resultados obtenidos en los escenarios planteados, analizando la eficiencia de las diferentes técnicas de acceso y estrategias para el control de potencia.

2. LONG TERM EVOLUTION (LTE)

A continuación se va a realizar una breve descripción de su evolución histórica de las comunicaciones móviles así como una breve introducción a los aspectos más relevantes de la tecnología LTE. Una vez se tenga una idea clara de lo que LTE representa y sus potenciales capacidades, se procederá a explicar las diferentes técnicas y mecanismos de control de potencia utilizados para la gestión de recursos, con el fin de entender de manera más clara el desarrollo y objetivo de este proyecto.

2.1. Evolución histórica de las comunicaciones móviles digitales

Para llegar a entender la existencia de la tecnología LTE hay que conocer la historia de las comunicaciones móviles y su evolución hasta el momento.

A lo largo de los años, los sistemas de comunicaciones móviles han sido implementados por diferentes tecnologías que en su tiempo brindaron una solución adecuada a las necesidades del momento [1].

El estándar de tecnología inalámbrica analógica de primera generación surgió a principios de los años 80, conocido como redes celulares (malla de células que abarcan diferentes áreas de cobertura, donde cada una de ellas cuenta con una estación base). Estos sistemas se caracterizaron por ser estrictamente para voz y por utilizar canales de radio analógicos. Sin embargo, la calidad de los enlaces de voz y la velocidad de datos eran muy bajas. Una de las tecnologías predominantes de esta generación fue AMPS (*Advanced Mobile Phone System*).

A principios de los años 90 apareció la segunda generación (2G) que, a diferencia de la primera, se caracterizó por ser digital. Los principales estándares desplegados para esta tecnología fueron: GSM (*Global System for Mobile*), CDMA (*Code Division Multiple Access*) y PDC (*Personal Digital Communications*). Con los sistemas 2G se incorporaron nuevos servicios como fax y SMS (*Short Message Service*) y se consiguieron mayores velocidades de transmisión por voz. Sin embargo, el servicio de datos ofrecido era limitado. Con el fin de dar un mejor soporte a servicios de datos, se implementaron soluciones como GPRS (*General Packet Radio Services*), perteneciente a la generación intermedia conocida como 2.5G. Se trataba de una tecnología basada en la conmutación de paquetes, en lugar de la conmutación de circuitos utilizada por GSM, que permitió la incorporación de nuevos servicios de mensajes multimedia (MMS) y de correo electrónico. Sin embargo, los servicios ofrecidos por la generación 2.5G se veían limitados por la baja tasa de transferencia de datos. Como respuesta, los operadores y fabricantes de equipos de telecomunicaciones móviles se centraron en aumentar la capacidad de transmisión de datos

para poder ofrecer a los usuarios nuevos servicios como conexión a Internet, videoconferencias y descarga de archivos a velocidad máxima de 2Mbps en las mejores condiciones. Asimismo, los estándares adoptados previamente en diferentes partes del mundo eran diferentes, por lo que se decidió estandarizar un único protocolo de red a nivel mundial. Así nació 3G. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) definió las demandas de redes móviles 3G con el estándar IMT-2000.

A finales de 1998 surgió el grupo 3GPP que, a partir de los requisitos definidos por la ITU, se encargó de realizar las especificaciones de un sistema global que respondiera a los requisitos del estándar IMT-2000. Se definió el estándar UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) cuyo principal avance fue el uso de la tecnología WCDMA (*Wide Code Division Multiple Access*), a diferencia de los sistemas 1G que se basaban en tecnologías de acceso múltiple por división en frecuencia o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) o 2G que utilizaba el acceso múltiple por división en el tiempo o TDMA (*Time Division Multiple Access*). Las redes 3G permitieron a los operadores de red ofrecer servicios más avanzados (telefonía de voz inalámbrica de área amplia, videollamadas y datos inalámbricos de banda ancha), al tiempo que lograron una mayor capacidad de red a través de una mejor eficiencia espectral.

Más adelante surgieron evoluciones del UMTS (3.5 G), como HSDPA, HSUPA y el HSPA+ (3.75 G), que ofrecían una mejor conexión de banda ancha móvil. Poco antes de 2010, las redes UMTS y HSPA llegaron al 85 % de los abonados móviles por lo que el 3GPP quiso garantizar la ventaja competitiva sobre otras tecnologías [2]. De esta manera, surge la generación 4G o LTE que utiliza IP para transportar datos extremo a extremo ofreciendo servicios con una calidad de servicios adecuada en cualquier momento, en cualquier lugar y con el mínimo coste posible, consiguiendo velocidades de acceso mayores de 100 Mbit/s en movimiento y 1 Gbit/s en reposo.

La ITU creó un comité llamado IMT-Advanced, en el que se defieron los requisitos necesarios para que un estándar fuese considerado 4G. A partir de entonces se empezó a estudiar qué tecnologías eran las candidatas para ser denominadas 4G. Se llegó a la conclusión que LTE no era una tecnología de cuarta generación porque no cumplía los requisitos definidos por el IMT-Advanced respecto a velocidades de transmisión y eficiencia espectral. Aun así la ITU declaró en 2010 que los candidatos a 4G, LTE Advanced y WIMAX, podían publicitarse como 4G.

Los servicios de comunicación móvil de cuarta generación se convirtieron en mercado de masas en 2014.

En cuanto a la futura generación 5G, en la actualidad hay distintos proyectos por todo el mundo sobre el estudio de las tecnologías y especificaciones para esta nueva generación, que se espera que esté en funcionamiento en 2020. Se espera conseguir conectividad total entre dispositivos, el acceso a la información y los servicios en cualquier parte, y una gran calidad de servicio.

2.2. Redes heterogéneas (HetNets)

Como ya se ha comentado anteriormente, para hacer frente, de una manera eficiente, al creciente número de abonados de datos móviles que compiten por recursos radio limitados, los operadores de redes se plantearon la necesidad de crear nuevas tecnologías y topologías de red más eficaces para la transmisión que permitiesen garantizar la demanda de datos requerida por los usuarios con una calidad adecuada, consiguiendo una mejor eficiencia espectral.

Sin embargo, en las áreas con alta demanda de tráfico, como pueden ser zonas comerciales o centros de ciudades, se requiere flexibilidad de espacio para instalar nuevas antenas, lo que no siempre es factible debido a las limitaciones urbanísticas. Asimismo, en los bordes de las celdas, los despliegues tradicionales dan lugar a una degradación notable del rendimiento. Por ello, para dar respuesta a la creciente demanda de datos, surge como alternativa a las macroceldas la instalación de celdas de menor tamaño y potencia (small-cells) que proporciona esa capacidad adicional donde es necesaria, sin requerir grandes gastos de instalación [3, 4].

Las small-cells, pequeñas estaciones base o celdas pequeñas, son puntos de acceso que transmiten con baja potencia y que mejoran la cobertura de redes móviles a un coste bajo, a la vez que aumentan la calidad de la señal con un menor consumo de las baterías.

Tradicionalmente, el aumento de capacidad de redes celulares homogéneas se ha realizado mediante un mayor reuso frecuencial (aumentando el número de sectores) en elementos de acceso macro. Sin embargo, a instalación de elementos de macro estaciones base puede requerir una amplia concesión de permisos y gastos, especialmente en grandes zonas urbanas debido a las restricciones urbanísticas. Una alternativa es desplegar estaciones base de baja potencia (micro y femto celdas) bajo el paraguas de macro eNBs existentes, mejorando así las prestaciones/rendimiento en el borde de las celdas y, por lo tanto, los usuarios localizados en él dejarán de recibir un servicio limitado, como sucedía hasta el momento. Asimismo, estos despliegues también se utilizan para dar servicio a puntos que, de forma esporádica, puedan requerir un aumento de la capacidad (por ejemplo, una zona de playa en verano), sin incurrir en gastos elevados.

2.3. Aspectos fundamentales y funcionamiento de la tecnología LTE

Después de conocer la historia y evolución de las comunicaciones móviles y comprender el concepto de red heterogénea, se pasará a detallar los aspectos fundamentales de LTE, tales como sus características principales, las tecnologías de transmisión del nivel físico que se utilizan en el enlace descendente y ascendente, y la arquitectura del sistema.

2.3.1. Características principales de LTE

La tecnología LTE tiene una serie de particularidades que permiten alcanzar mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio que los sistemas predecesores [5].

Las características principales de LTE son:

- Uso eficiente del espectro:
 - Utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) en el enlace descendente.
 - Utiliza SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el enlace ascendente.
- Compatibilidad con otras tecnologías de 3GPP como los sistemas 2G y 3G actuales, así como con aquellos que no pertenecen a 3GPP, como por ejemplo WIMAX.
- Proporciona un alto nivel de seguridad.
- Utilización flexible del espectro debido a la existencia de diversos anchos de banda adaptativos: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz dependiendo de la zona geográfica de despliegue.
- Mayor velocidad de datos con latencia reducida.
- Capacidad y cobertura mejoradas del sistema.
- Rendimiento mejorado en el borde de la celda (en términos de capacidad de transmisión).
- Ofrece a sus usuarios mejor calidad de experiencia, especialmente para servicios en tiempo real tales como Voz sobre IP, vídeo de alta definición y otras aplicaciones heredadas.
- Costo reducido para el operador.

2.3.2. Arquitectura de red LTE

La arquitectura genérica de un sistema de comunicaciones celular consiste en tres elementos principales:

- Equipo de usuario: cuenta con una tarjeta inteligente, que denominamos tarjeta SIM (*Subscribe Identity Module*), que contiene la información necesaria para poder conectarse a la red y poder disfrutar de los servicios ofrecidos por el proveedor.
- Red de acceso: está formada por las estaciones base y, dependiendo de la generación, por equipos controladores de estaciones base. Se encarga de realizar la comunicación con los equipos de usuario y es la responsable de gestionar los recursos radio disponibles para poder ofrecerlos eficientemente.

- Red troncal: se encarga del control de acceso a la red celular, por ejemplo de la autenticación de los usuarios, gestión de interconexión con otras redes, etc. Los equipos que conforman dicha red albergan funciones de conmutación de circuitos, routing, bases de datos, etc.

En cuanto a LTE, la idea es la misma que en las otras generaciones. El sistema se divide en los tres elementos mencionados anteriormente: un equipo de usuario, una nueva red de acceso llamada E-UTRAN y una red troncal denominada EPC. Ambas redes proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas IP como la plataformas IMS o Internet.

La red de acceso radio E-UTRAN se compone de una única entidad de red denominada *evolved Node B* (eNB), que constituye la estación base de E-UTRAN y es la encargada de proporcionar la conectividad entre los usuarios y la red troncal. Asimismo se utiliza para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN), así como desde redes no 3GPP.

Como se puede observar en la Figura 2.1, la interfaz entre E-UTRAN y EPC, denominada S1, permite gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. Y, por otro lado, las conexiones con las redes de paquetes externas IP como la plataformas IMS o Internet se llevan a cabo mediante la interfaz SGi de la EPC.

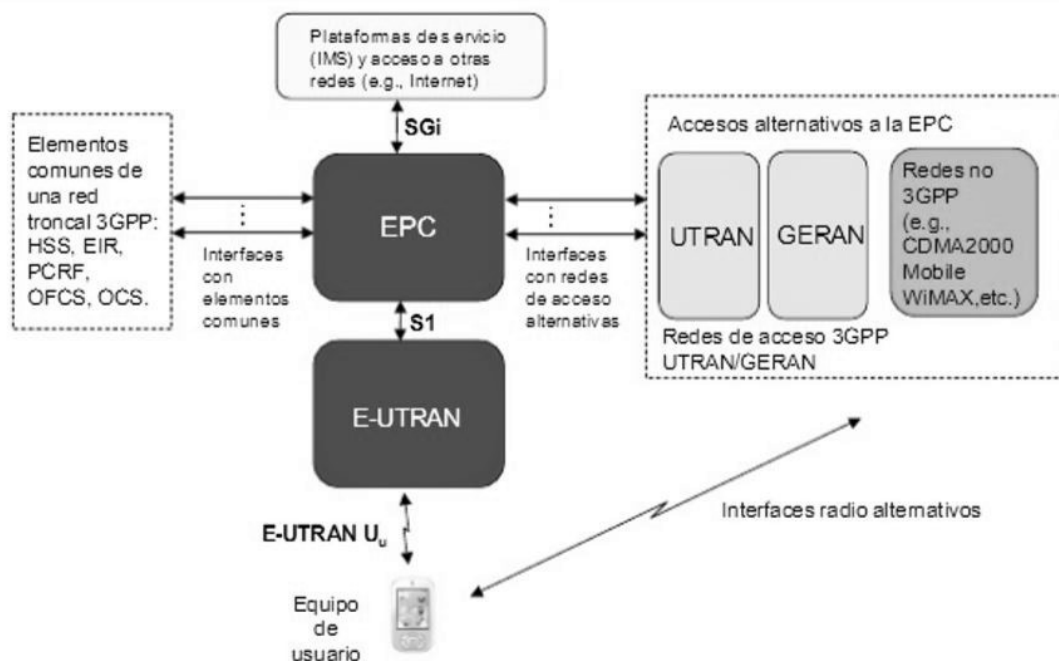


Fig. 2.1. Arquitectura del sistema LTE [6].

2.3.3. Tecnologías de nivel físico: OFDMA, SC-FDMA

En este apartado se detallan los fundamentos más importantes del nivel físico que se implementan en un sistema LTE. Dicha tecnología utiliza la modulación OFDM (multiplexación ortogonal por división en frecuencia) adaptada para proporcionar un esquema de acceso múltiple [6, 7].

OFDM se basa en la multiplexación de un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias, ortogonales entre sí y moduladas independientemente. Gracias a las bajas tasas de datos que son llevados por cada portadora hay menos interferencia entre símbolos en el receptor (ISI) y proporciona un alto nivel de eficiencia espectral.

En un sistema OFDM, los recursos están disponibles en el dominio del tiempo por medio de símbolos OFDM y en el dominio de la frecuencia por medio de subportadoras, los cuáles pueden organizarse en subcanales para su asignación a usuarios individuales. A continuación se detalla las particularidades del enlace ascendente y descendente de LTE, de acuerdo a la técnica de acceso basada en OFDM que se usa.

Enlace descendente - OFDMA

El sistema LTE utiliza la técnica de acceso múltiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) en el enlace descendente, la cuál es una versión multiusuario de la conocida OFDM. Se trata de un esquema de acceso múltiple que permite que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en función de la necesidad de cada usuario, de la velocidad que necesita y de las condiciones del canal.

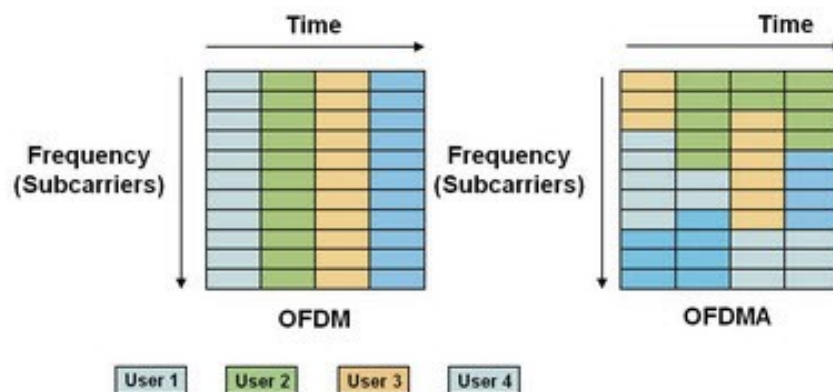


Fig. 2.2. Técnica OFDM Y OFDMA [8].

Como se muestra en la Figura 2.2, la asignación de recursos en LTE se puede realizar tanto en el tiempo como en la frecuencia. OFDM admite múltiples usuarios sólo a través de TDMA (*Time Division Multiple Access*), sólo puede soportar un usuario en un momento dado y todas las subportadoras del símbolo se utilizan para proporcionar datos a dicho usuario. Mientras que, OFDMA es compatible con TDMA(*Time Division Multiple Access*) o FDMA(*Frequency Division Multiple Access*) o ambos al mismo tiempo, permitiendo que las portadoras de cada símbolo puedan dividirse entre múltiples usuarios, consiguiendo así un mejor uso de los recursos de radio.

Esta técnica de transmisión presenta varias ventajas sobre los sistemas de una sola portadora que fueron la principal razón para adoptarla como la técnica de soporte para comunicaciones móviles en LTE:

- Robustez frente a desvanecimientos selectivos en frecuencia:
 - En sistemas multiportadora, al dividir el espectro en varios subcanales hace que cada subcanal vea un "desvanecimiento plano".
- Uso eficiente del espectro gracias a la superposición de subcanales ortogonales.
- Robustez contra los efectos de las interferencias intersimbólicas (ISI) gracias al uso del prefijo cíclico (CP), siempre que la duración del CP sea más larga que la propagación del retardo del canal.
- La ortogonalidad entre subportadoras hace que la interferencia entre canales (ICI) se minimice.
- Es computacionalmente eficiente debido al uso de la FFT (*Fast Fourier Transform*).

En el enlace descendente, un elemento de recurso o *resource element* puede definirse como una subportadora durante un símbolo OFDM, mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Como se muestra en la Figura 2.3, los elementos de recursos se agrupan en bloques de recursos o *resource blocks* (PRB), donde cada bloque ocupa 180 KHz, equivalente a doce subportadoras equiespaciadas 15KHz entre ellas y con una duración de 0.5 ms por ranura en el dominio del tiempo. Puesto que, por cada bloque se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada, con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, en total se tiene 84 recursos físicos disponibles cuando se usa en prefijo cíclico corto. Las modulaciones que se pueden emplear en este enlace son QPSK, 16QAM y 64QAM.

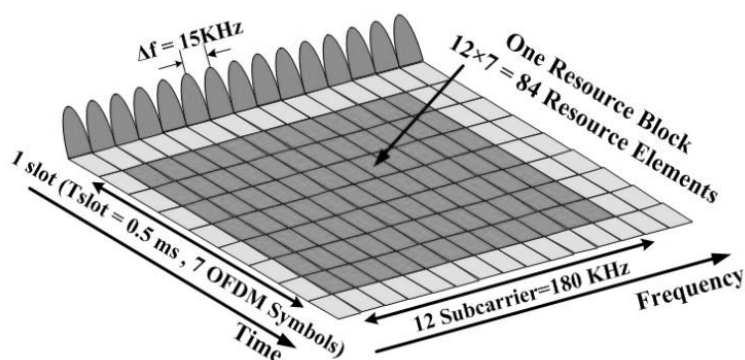


Fig. 2.3. Concepto de PRB [9].

A continuación se muestra una tabla con los números de bloques de recursos físicos disponibles dependiendo del ancho de banda del sistema LTE:

TABLA 2.1. NÚMERO DE PRBS EN FUNCIÓN DEL BW.

Ancho de banda del canal	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRBs	6	15	25	50	75	100

Este esquema de acceso múltiple presenta numerosas ventajas importantes en comparación con aquellos que utilizaban anteriormente los sistemas de comunicación móvil. Algunas de ellas son:

- Proporciona diversidad frecuencial ante canales selectivos en frecuencia asignando a un mismo usuario subportadoras no contiguas, suficientemente separadas e independientes entre sí.
- La técnica OFDMA permite acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio de cada uno, simplemente asignando más o menos subportadoras.
- Consigue diversidad multiusuario mediante la asignación de subportadoras de manera dinámica. Debido a que el canal radio presenta desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, se puede intentar seleccionar para cada subportadora el usuario que presente una mejor SNR, consiguiendo así mejor eficiencia espectral y velocidad de transmisión.
- Facilita la acomodación de servicios con diferentes requisitos de calidad gracias a la subdivisión de la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha permitiendo una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno.

En resumen, en OFDMA se transmiten "M" símbolos en paralelo, repartidos en el ancho de banda total disponible y donde cada símbolo tiene una duración igual al tiempo de símbolo. Esto implica que se superpongan varios símbolos simultáneamente generando una elevada relación entre la potencia instantánea y la potencia media (PAPR), lo que es un problema para el terminal del usuario debido a que la potencia de transmisión debe estar por debajo de cierto umbral. Por este motivo, para evitar este alto consumo de energía, el PAPR debe limitarse en cierta medida. Esto llevó a 3GPP a elegir una técnica diferente para el enlace ascendente LTE llamada SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*).

Enlace ascendente - SC-FDMA

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, el sistema LTE utiliza el esquema de modulación de acceso múltiple SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el enlace ascendente ya que presenta un bajo valor de PAPR, y permite eliminar la interferencia intracelular; sin embargo, el rendimiento del sistema seguirá limitado por la interferencia entre células.

Esta técnica es muy similar a la que se utiliza en el enlace descendente: divide el ancho de banda de transmisión en múltiples subportadoras paralelas manteniendo la ortogonalidad de las subportadoras gracias a la extensión cíclica durante el intervalo de guarda. La separación entre subportadoras, igual que ocurre en OFDMA, es de 15kHz, en grupos de 12 subportadoras cada uno, cuyas modulaciones en dicho enlace pueden ser QPSK, 16QAM y 64QAM. Sin embargo, en este caso se efectúa una precodificación previa al proceso de transmisión OFDM de los símbolos que se van a transmitir.

La diferencia entre la transmisión SC-FDMA y la transmisión OFDMA es el uso de un bloque DFT adicional. En el transmisor, tras pasar por el módulo S/P que convierte la señal serie en paralelo, se pasa a través de N-Point DFT (*discrete Fourier transform*) donde ($M < N$) que transforma los símbolos en el dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. A partir de aquí, los símbolos resultantes se asignan a la banda deseada en el ancho de banda completo del canal y se convierten de nuevo al dominio temporal mediante el bloque IDFT (*discrete inverse Fourier transform*). Por último, la señal pasa por el convertidor paralelo/serie y se le añade el prefijo cíclico para reducir la interferencia entre los símbolos. Al final, la señal se convierte de digital a analógica. La siguiente figura presenta el diagrama de bloques completo.

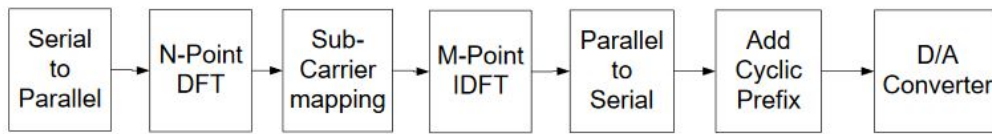


Fig. 2.4. Diagrama de bloques SC-FDMA [10].

En resumen, en SC-FDMA se transmiten "M" símbolos de datos secuencialmente, donde cada símbolo ocupa todo el ancho de banda disponible y con una duración igual a una parte del tiempo de símbolo.

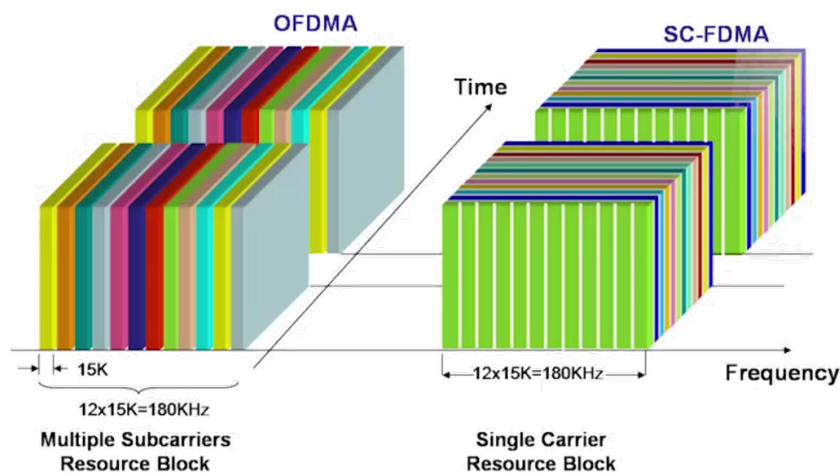


Fig. 2.5. Tecnologías de nivel físico utilizadas en un sistema LTE [11].

La Figura 2.5 muestra como en OFDMA los símbolos se transmiten cada uno a través de una subportadora, mientras que SC-FDMA cada símbolo se extiende sobre todas las subportadoras asignadas.

2.3.4. Sectorización

El uso del esquema de transmisión SC-FDMA elimina la interferencia intracelular; sin embargo, el rendimiento del sistema sigue limitado por la interferencia entre células. Por esta razón, 3GPP LTE ha optado por utilizar la sectorización para conseguir mayor eficiencia espectral. El área total de servicio de las estaciones base se divide en pequeñas subáreas, denominadas celdas o células. De este modo, en cada una de ellas se ubica una estación radioeléctrica encargada de las comunicaciones de los usuarios móviles que se encuentran bajo su área de dominio. Este esquema celular permite la reutilización de frecuencias, es decir, todas las celdas de la red

utilizan las mismas bandas de frecuencias, consiguiendo mayor capacidad en la red, y reduciendo las señales interferentes. Aunque puede parecer más lógico la representación de celdas de forma circular, con este tipo de representación siempre quedan huecos entre células vecinas y muchos solapes [20]. En la Figura 2.6 se puede observar la diferencia entre ambos esquemas.

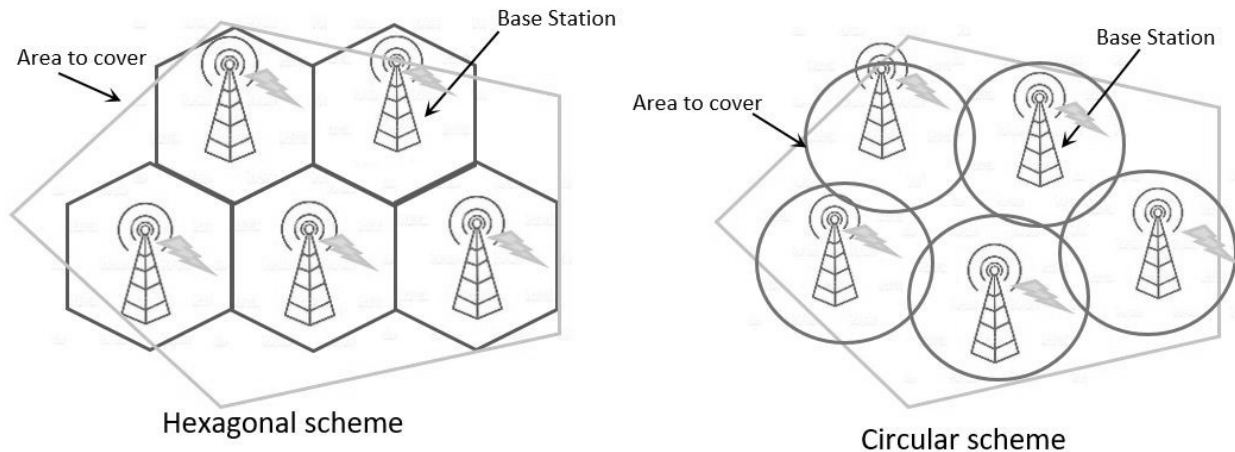


Fig. 2.6. Área de cobertura de las estaciones base.

2.4. Control de potencia LTE

En los sistemas de comunicación móvil existe una gran diferencia en la relación de señal a interferencia y ruido (SINR) que da como resultado un rendimiento diferente para los usuarios en función de la ubicación en la que se encuentren dentro de la celda. Asimismo, cuando en un mismo sistema se consideran múltiples celdas vecinas, la interferencia intercelular (ICI) es un factor importante para los UE ubicados cerca del borde de una celda, ya que pueden interrumpir las transmisiones de datos de enlace ascendente en las células vecinas. Para evitar esto, se proponen diferentes esquemas para la realización de *Uplink Power Control (UPC)* para LTE.

El primero, definido como control de potencia en lazo abierto (*Open Loop Power Control - OLPC*) o control de potencia fraccional (*Fractional Power Control - FPC*), permite la compensación total o parcial de las pérdidas de trayectoria y las variaciones de sombreado de la señal. Y, el segundo, *Close Loop Control (CLPC)* o *control de potencia basado en interferencia (IBPC)* permite ajustar la potencia del equipo de usuario (UE) con el fin de mejorar el rendimiento del sistema y compensar la interferencia intercelular (ICI) generada [13, 14].

El objetivo principal de ambos mecanismos es maximizar la potencia recibida de las señales deseadas y limitar la interferencia generada consiguiendo mejorar la capacidad del sistema, cobertura y calidad del usuario (QoS) al mismo tiempo que se reduce el consumo de energía de los

terminales. En este trabajo nos hemos centrado en el esquema OLPC, debido a su simplicidad y adecuación al tipo de simulación que se ha realizado.

2.4.1. Control de lazo abierto (*Open Loop Control*)

La técnica OLPC se emplea un factor de compensación de pérdida de trayectoria, α , comunicado por la eNB, que es el resultado de la medición del *pathloss*, obtenido a partir de las señales enviadas por parte del UE a la estación base. El objetivo de este parámetro es compensar la atenuación experimentada por cada usuario y que, en el estándar LTE, puede tomar los siguientes valores: 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9, con el fin de lograr una potencia media de señal recibida para todos los usuarios. Los valores más altos aseguran una mayor compensación, la cuál se alcanza cuando $\alpha = 1$. Por otro lado, los valores de compensación bajos se usan para usuarios cerca del borde de la celda, con el fin de disminuir el ICI y preservar el tiempo de vida de la batería de los UE.

2.5. Técnicas de selección de acceso

Con la llegada de las redes heterogéneas (*HetNets*) en las que se combinan macro y small-cells se consiguió mejorar la capacidad y cobertura de la red. A su vez, para utilizar de manera eficiente los recursos de la red, junto con la densificación de células pequeñas se han estudiado nuevas técnicas de selección de acceso que permitan de forma efectiva explotar el incremento potencial de capacidad ofrecido por las nuevas topologías heterogéneas.

2.5.1. RSRP (*Reference Signal Received Power*)

En las redes tradicionales homogéneas, la selección de celdas se basa en el criterio de máxima RSRP (potencia recibida de la señal de referencia) en el enlace descendente y la calidad de recepción de la señal de referencia (RSRQ), transmitida desde las células macro.

De manera que, la celda seleccionada por el usuario, es aquella que proporciona un mayor valor de RSRP, el cuál se obtiene a partir de una serie de mediciones realizadas por el usuario en la estación base.

Sin embargo, en un escenario Hetnet, debido a la gran diferencia de potencia de transmisión entre macro y small-cells, el uso de esta técnica podría no ser la mejor estrategia a adoptar. Las macrocélulas con mayor potencia de transmisión atraerán a la mayoría de los usuarios por lo que podrían no tener suficientes recursos para atenderlos eficientemente, mientras que los recursos disponibles en las picocélulas no se utilizarían por completo ya que serían pocos usuarios

los que seleccionarían el nodo de baja potencia para cursar los servicios. Como consecuencia, se provocará una reducción severa del rendimiento del sistema. Por lo tanto, si se atienden más usuarios por las celdas de baja potencia, se podría conseguir un incremento significativo del mismo y, por ello surgen técnicas como CRE para este nuevo tipo de redes [15].

2.5.2. CRE (*Cell Range Expansion*)

La asignación adecuada del tráfico del usuario se identifica como un requisito principal en HetNets debido a que las celdas pequeñas deben colocarse de tal manera que mejoren la calidad del usuario (QoS) por la macrocélula y no para eliminar todos los usuarios de la macro. En el esquema CRE, se amplía el área de cobertura de las small-cells agregando un offset positivo (*bias*) al RSRP recibido de pico eNB. De este modo, el usuario selecciona preferentemente desde la small-cell incluso cuando no es de la que recibe el mayor nivel de señal, desviando así parte del tráfico de las macrocélulas.

Para un valor de *bias* pequeño, el número de usuarios conectados a small-cells es muy bajo ya que el RSRP recibido del macro eNB es más fuerte que el que se recibe de las celdas pequeñas más el valor de offset. Esto provocará una disminución del rendimiento ya que al atender más usuarios, los recursos macro podrían no ser suficientes mientras que pocos usuarios compartirán los recursos de la celda pico. Por otro lado, para un valor de *bias* grande, se conectarán más usuarios a la picocélula pero con una mayor interferencia para los usuarios de borde de celda pico desde la celda macro. Por lo tanto, el valor óptimo del *bias* es difícil de deducir ya que depende tanto del despliegue de nodos macro/pico como de los usuarios. En la Figura 2.7 se muestra el funcionamiento de esta técnica de selección de acceso.

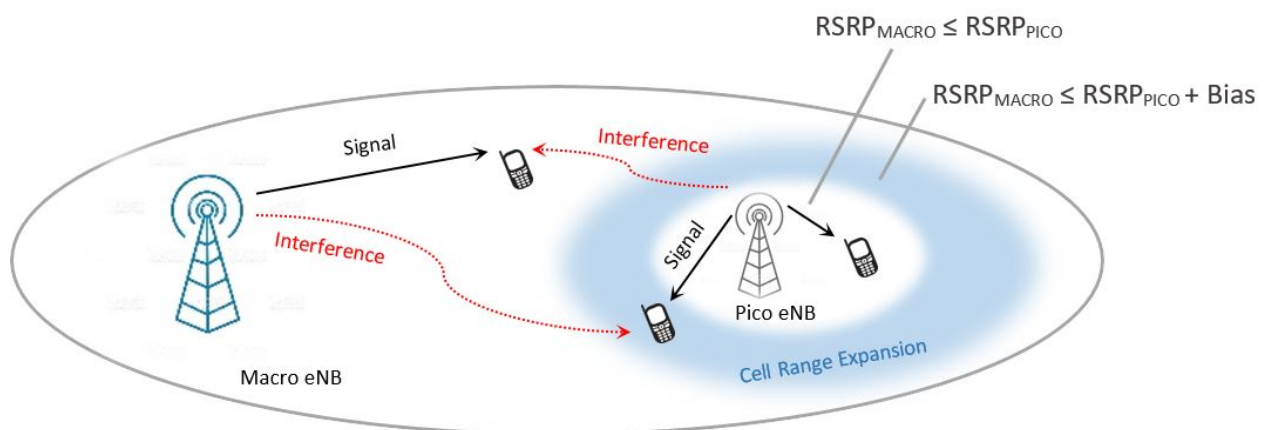


Fig. 2.7. Técnica CRE.

Para la realización de este trabajo se han considerado tres valores diferentes de *bias* 3,6 y 10 dB (Capítulo 4).

2.5.3. DUDe ((*Downlink/Uplink Decoupling*))

Hasta el momento, el terminal móvil del usuario siempre se ha asociado a la misma estación base para recibir y enviar datos, como se ha considerado en las dos técnicas descritas, RSRP y CRE ya que se pensaba que esto era lo óptimo, pues se creía que si la conexión era mejor en un sentido también lo sería en el otro.

Sin embargo, debido a la creciente heterogeneidad de las redes, se ya puesto en duda esta consideración ya que, para algunos dispositivos de una red HetNet, la elección de una estación base para el acceso al enlace descendente no necesariamente tiene que ser la solución óptima para el acceso del enlace ascendente. Esto se debe a la diferencia de potencia de señal e interferencia que existe en ambas direcciones. Por lo tanto, en ciertas circunstancias es beneficioso desacoplar ambos enlaces y tratarlos independientemente, lo que conduce al uso de esta nueva estrategia denominada DUDe, en la cuál la selección de células del enlace descendente se basa en la potencia recibida de dicho enlace, mientras que, en el ascendente, se basa en las pérdidas de propagación [17, 18].

El uso de esta técnica de selección celular presenta algunas ventajas respecto a la solución tradicional tales como:

- Si un terminal móvil asociado a una macrocélula para el enlace de bajada, se asociase a una de las small-cells que tiene más cerca para transmitir por el enlace ascendente, se reduciría la distancia con la estación base y, por tanto, disminuirían las pérdidas de propagación, lo cual implicaría directamente un aumento de la SINR que tendría ese usuario.
- La reducción de las pérdidas de propagación permitiría disminuir la potencia a la que tendría que transmitir los usuarios a través de los diversos mecanismos de control de potencia que reducirían el consumo de energía de los terminales.
- Al reducir la potencia de transmisión, disminuiría la interferencia que generarían los demás usuarios del mismo área al emitir por el enlace ascendente, especialmente en los usuarios que tuvieran un valor bajo de SINR.
- Al conseguir una SINR más elevada, se obtendría mayor eficiencia espectral y velocidad de transmisión de datos, lo que permite a los usuarios acceder a un mayor número de recursos.
- El uso de esta técnica permite repartir la carga, adaptándola a los recursos que dispone la estación base en ambos sentidos de la comunicación.

3. ENTORNO DE SIMULACIÓN

A continuación, se llevará a cabo una breve descripción de la herramienta QWNSyM *Generic Wireless Network System Modeler*, desarrollada por el Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria, indicando cómo funciona, su composición y las nuevas implementaciones que se han realizado para obtener resultados concretos que nos permitirán comparar las ventajas obtenidas con el uso de las diferentes estrategias de red definidas en apartados anteriores [19].

3.1. Introducción a la herramienta

GWNSyM es una herramienta de simulación genérica que permite realizar simulación a nivel de sistema de forma sistemática. En concreto, su implementación se ha centrado en redes LTE, para las que se han implementado diferentes estrategias de selección de acceso y gestión de recursos.

En cuanto al marco de simulación, se basa en la metodología de MonteCarlo, en las que se utilizan varias fotografías (*snapshots*) independientes para evaluar el rendimiento de la red. Se ha implementado como un conjunto de librerías, donde se pueden agregar fácilmente nuevos modelos e incorporar código de implementaciones externas. Asimismo, para facilitar las modificaciones de la arquitectura del sistema de red, GWNSyM presenta un sistema de configuración que establece por separado la configuración estática de las entidades de red y las relaciones de pertenencia entre ellas permitiendo realizar modificaciones de la arquitectura de red simplemente modificando su configuración sin tener que escribir el código de nuevo.

3.2. Composición de la herramienta

Esta herramienta se basa en dos abstracciones genéricas: *Tipos* y *Acciones*. Un *Tipo* se define como un conjunto de entidades de red, tanto físicas como virtuales, que tienen la misma implementación real y configuración (dispositivos de usuario, operadores, servicios, etc...). Dicha configuración puede agregar elementos de otro *Tipo* por lo que se puede definir como una combinación de varios *Tipos*.

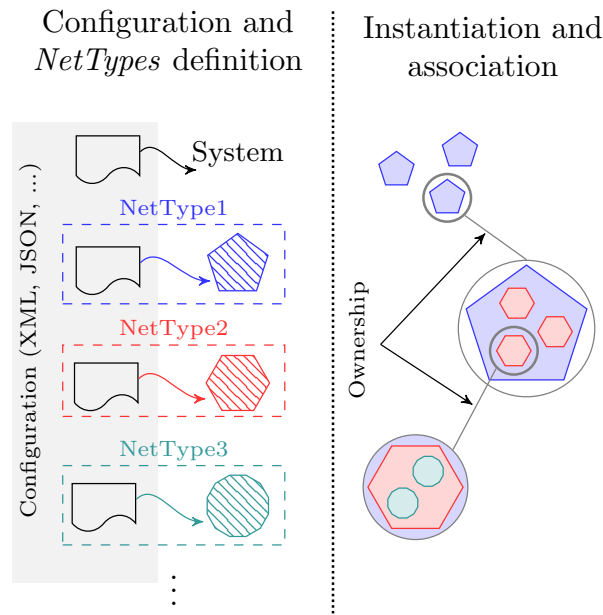


Fig. 3.1. Representación abstracta de la instancia *Tipo* dentro de GWNSyM

La Figura 3.1 permite entender mejor este nuevo concepto que, en un principio, puede resultar algo confuso. En primer lugar, para cada uno de los modelos, representados con línea discontinua, especifica la implementación real de una entidad de red. En función de la configuración que se le aplica (representada en color negro en la Figura 3.1) se agregan a un *Tipo* concreto. A continuación, en función de la configuración concreta de cada Tipo, se crean instancias de los elementos de forma recursiva, tal como se muestra en el lado derecho de la Figura 3.1. El proceso de instanciación da lugar a un árbol de dependencias de todas las entidades existentes en el sistema, siendo el nodo inicial el propio sistema.

Por último, las *Acciones* definen las interacciones que tienen lugar entre las diferentes entidades de red. En general, representan comportamientos del sistema, abarcando desde modelos físicos (por ejemplo, propagación) hasta políticas de red (por ejemplo, técnicas de selección de acceso o control de potencia). Cada *Acción* toma como parámetros de entrada uno o más *Tipos* y se ejecutan de forma secuencial en cada fotografía de la simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, un elemento importante de la herramienta son los archivos de configuración. Los cuáles contienen información básica referida a los usuarios, servicios y estaciones base y que es independiente de cálculos o del despliegue realizado como, por ejemplo, la capacidad de los servicios disponibles, la potencia máxima de transmisión, frecuencia, ganancias, etc. También pueden contener información sobre la simulación como el tiempo de fotografía *snapshot*, el tiempo total de simulación, etc.

3.2.1. Procedimiento general de simulación

El primer paso será la definición de los diferentes *Tipos* con su correspondiente configuración. En función de ésta, se crean instancias de los elementos de la red y se genera el árbol de dependencias. A continuación, tras la creación de instancias, se definen las *Acciones* para posteriormente ejecutarlas. En primer lugar, se llevarán a cabo aquellas denominadas como *Pre-Acciones*, las cuáles permiten el despliegue de elementos estáticos y, a continuación, se ejecutarán las acciones principales de forma secuencial. Tras finalizar el bucle principal, se aplican aquellas definidas como *Post-Acciones* encargadas de extraer resultados sobre las acciones principales ejecutadas en el paso anterior.

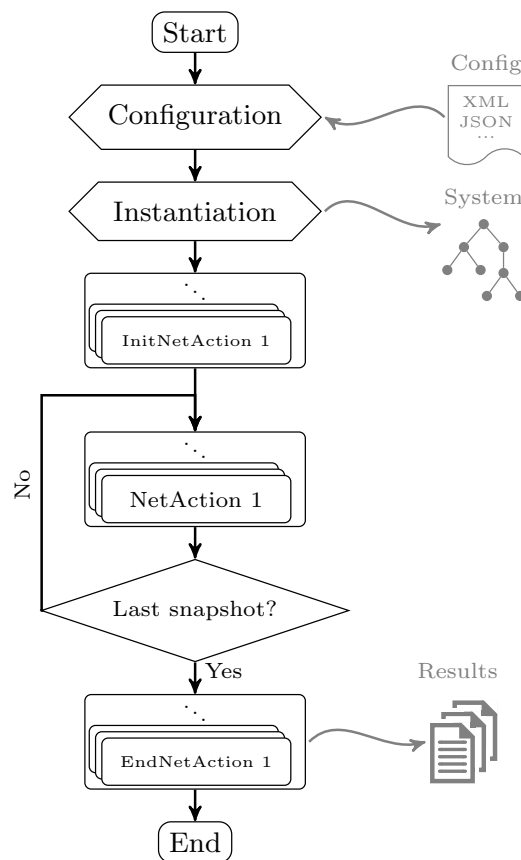


Fig. 3.2. Metodología de simulación.

3.3. Implementación de escenarios de simulación

Una vez explicada la funcionalidad general del entorno de simulación, se van a describir los módulos que se han creado para el desarrollo del trabajo y las diferentes entidades de red. Para comenzar, se definirán cinco *Tipos* con sus correspondientes configuraciones:

- LTE UE:

Estos elementos implementan el dispositivo UE de LTE. En este sentido, contiene información relacionada con las celdas LTE y el estado de las conexiones.

- Servicios:

Estas entidades representan servicios cursados por los usuarios, guardando información como el tráfico ofrecido en cada fotografía.

- Usuarios:

Estas entidades representan a los usuarios, y guardan información tal como su posición. Además, las entidades de este tipo contienen elementos LTE UE.

- Celdas LTE:

Estas entidades representan celdas LTE. De acuerdo a su configuración se diferencian pico y macro celdas en función de la cantidad de recursos, potencia de transmisión y patrones de radiación de la antena.

- Estaciones base LTE:

Finalmente, estas entidades definen las estaciones base. De acuerdo a su configuración distinguimos entre los tipos macro y pico, que, a su vez, contienen celdas del tipo correspondiente. La principal diferencia entre cada tipo de estación base es en número de celdas que contiene: 3 para las macro representando 3 sectores, y una para las pico con antena omnidireccional.

De forma más detallada, dentro del archivo de configuración de los usuarios se puede encontrar información sobre los tipos de servicios que se están cursando y las características de cada clase de usuario. En el caso del dispositivo LTE, contiene información relativa a los enlaces de transmisión como la potencia máxima a la que transmiten los terminales, figura de ruido, ganancia de la antena tanto en transmisión como en recepción, la SINR objetivo en el enlace ascendente, así como un parámetro para compensar las pérdidas de propagación, etc. Para las estaciones base se indica si son de tipo macro o micro, el número de celdas, su capacidad, potencia a la que transmiten, frecuencia, ganancias, etc. Por último, existe un archivo de configuración global que indica el tiempo de fotografía *snapshot*, el tiempo total y el número de usuarios y estaciones base de cada tipo que se van a desplegar. En la Figura 3.3 se definen los *Tipos* descritos anteriormente y, en la Figura 3.4, se muestra el árbol de dependencias de las entidades de red del sistema tras la creación de instancias de los elementos dependiendo de la configuración de cada *Tipo*.

```

net.Type<User, UserConf>("USER");
net.Type<LteUe, LteUeConf>("LTE_UE", USERS_CONF);

net.Type<LteCell, LteCellConf>("MACRO_CELL", EnbType::MACRO, ENBS_CONF);
net.Type<LteEnb, LteEnbConf>("MACRO", EnbType::MACRO, ENBS_CONF);
net.Type<LteCell, LteCellConf>("PICO_CELL", EnbType::PICO, ENBS_CONF);
net.Type<LteEnb, LteEnbConf>("PICO", EnbType::PICO, ENBS_CONF);
net.Type<Service, ServConf>("GENERIC_SERVICE", ServType::GENERIC, USERS_CONF);

net.SetTreeBase("USER",{ "USER", "NUMBER"});
net.SetTreeBase("MACRO",{ "MACRO", "NUMBER"});
net.SetTreeBase("PICO",{ "PICO", "NUMBER"});
net.SetConfig<gnsml::Configurer>(GLOB_CONF);

net.Deploy();
net.PrintInstances();

```

Fig. 3.3. Definición de las diferentes entidades de red.

```

===== INSTANCIATED TREE =====
|-PICO [50]
|-PICO::PICO_CELL [1]
|-MACRO [7]
|-MACRO::MACRO_CELL [3]
|-USER [100]
|-USER::LTE_UE [1]
|-USER::GENERIC_SERVICE [1]
=====

```

Fig. 3.4. Instanciación elementos de red.

Una vez fijados los *Tipos*, se registran las *Acciones* que definen el comportamiento del sistema, como se muestra en la Figura 3.5:

```

net.Initializer<EnbHexLocator>({"MACRO"}, units::m(0), units::m(500), 2);
net.Initializer<EnbRandLocator>({"PICO"}, units::m(-600), units::m(600));
net.Action<ServiceAlwaysOn>({"USER::*:GENERIC_SERVICE"});
net.Action<UserCallUp>({"USER"});
net.Action<EnbCallUp>({"ENB"});
net.Action<SquareRandomLocator>({"USER"}, units::m(-600), units::m(600));
net.Action<RxPower>({"USER", "ENBS"}, AntennaType_e::HV, PropType_e::LOS);
net.Action<UplinkConn>({"USER"}, UplinkConn::Mode::{CRE,DUDE,RSRP},
    units::dB(BIAS_PICO_CRE), units::dB(0.0), units::dB(0.0));
net.Action<UplinkPowSimple>({"USER"}, UplinkPowSimple::PcMode::{01Pc,NoPc});
net.Action<PrintUsers>({"USER"}, PrintUsers::PrintType::POTUSERENB, args);
net.Run();

```

Fig. 3.5. Definición de las diferentes *Acciones*.

El primer paso es desplegar las diferentes entidades de red sobre el escenario mediante las Acciones *EnbHexLocator* y *EnbRandLocator* para posteriormente calcular la potencia recibida en el DL, *Acción RxPower*. Para ello, se debe escoger el tipo de antena y propagación, en nuestro caso, se ha escogido una antena HV (*High-Voltage*) en el modo de propagación LOS (*Light fo Sight*), lo que significa que existe visibilidad directa entre las antenas emisora y receptora, por lo que no debe haber obstáculo entre ambas. A continuación, se debe seleccionar el tipo de conexión para el enlace ascendente y, en el caso de la técnica CRE, se debe fijar el valor del offset (*bias*) para las small-cells, mientras que para las macro-cells es nulo. Una vez definido éste, se decide entre una de las técnicas de control de potencia que se han implementado en este trabajo (*Open Loop Power Control* (OLPC) o *No Power Control* (NOPC)). Y, por último, se extraen resultados gracias a la *Acción PrintUsers*. Para continuar se explicará de forma detallada cada una de las *Acciones* para poder entender mejor la función de cada una de ellas.

3.3.1. Despliegue elementos de red

Como primer paso, se procede al despliegue de estaciones base y usuarios en el escenario. Tanto los usuarios como las estaciones base pico se despliegan de forma aleatoria sobre el escenario, mientras que, las estaciones base macro se desplegarán de forma hexagonal cubriendo mejor el área total.

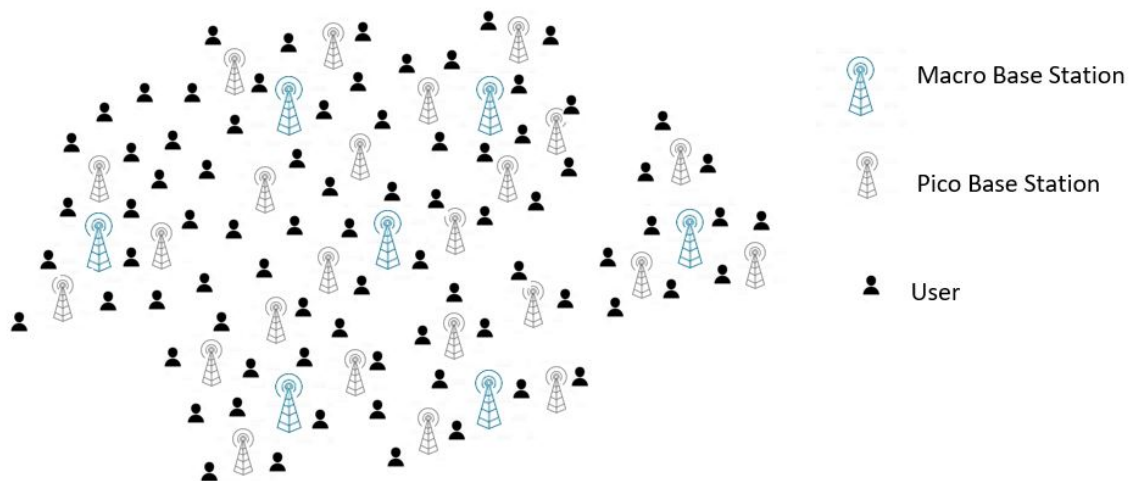


Fig. 3.6. Ejemplo despliegue escenario.

3.3.2. Potencia recibida en el Downlink

Una vez desplegadas todas las entidades de red, se calcula la potencia recibida por cada uno de los usuarios desde las diferentes estaciones base desplegadas en el escenario mediante la

siguiente fórmula:

$$P_{RX} = P_{TX} - \max[PL + \text{couplingloss} + \text{AntennaAtt} - G_{TX} - G_{RX}, MCL] \quad (3.1)$$

Donde:

- Ptx: es la potencia transmitida por la estación base.
- Couplingloss: son las pérdidas de acoplamiento del cable.
- AntennaAtt: es la atenuación de la antena dependiendo del tipo que se utilice.
- Gtx y Grx: Son las ganancias de transmisión y recepción de la estación base que dependen del tipo de estación base y cuyos valores están fijados en el archivo de configuración.
- MCL (*Minimum Coupling Losses*): son las pérdidas por acoplamiento, cuyo valor está fijado por el 3GPP y que dependerá del tipo de estación base [21, 22] como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 3.1. VALORES MCL FIJADOS POR 3GPP.

Environment	Scenario	MCL
Macro cell Urban Area	BS ↔ UE	70 dB
Macro cell Rural Area	BS ↔ UE	80 dB
Pico cell Local Area	BS ↔ UE	53 dB

- PL o *pathloss*: son las pérdidas de propagación entre el usuario y la estación base correspondiente, las cuáles se detallan a continuación.

Las pérdidas por propagación se han implementado de forma diferenciada para cada uno de los tipos de estaciones base; su valor depende de una serie de factores como la altura de las antenas, las distancias de los enlaces y el ambiente de propagación (urbana, rural, etc). Además, se tendrá en cuenta si la celda a la que se conecta el usuario es macro o micro y si existe línea de vista (*LOS*) o no (*NLOS*) [23]. En este trabajo sólo se han tenido en cuenta escenarios urbanos con antenas macro y pico y con línea de visión (*LOS*), en la Tabla 3.2 se muestran las expresiones para calcular el *pathloss*, el cuál es aplicable en un rango de frecuencias de 2 a 6 GHz.

Para el cálculo de pérdidas por propagación se tiene en cuenta un punto de ruptura, d'_{BP} , es la distancia de punto de corte para un caso *LOS*. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$d'_{BP} = 4(h_{BS} - 1)(h_{UT} - 1)f/c \quad (3.2)$$

donde, h_{BS} es la altura de la estación base en metros y h_{UT} es la altura del terminal de usuario en metros.

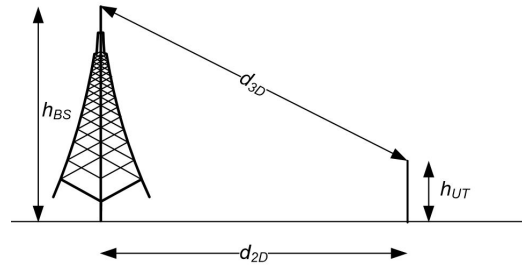


Fig. 3.7. Definición de distancias.

TABLA 3.2. MODELOS DEL PATHLOSS FIJADOS POR 3GPP.

Environment	Pathloss (dB)	Range of application/- default values/antenna height
Macro cell Urban Area → LOS	$PL=22\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c)$	$10m < d_{2D} < d'_{BP}$
	$PL=40\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} < 5000m,$ $h_{BS} = 25m,$ $1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$
Macro cell Urban Area → NLOS	$PL=161.04 - 7.1\log_{10}(W) + 7.5\log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2)\log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1\log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20\log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(17.625))^2 - 4.07) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$	$10m < d_{2D} < 5000m,$ $h = \text{height building average},$ $W = \text{width of the street},$ $5m < h < 50m,$ $5m < W < 50m,$ $10m < h_{BS} < 150m,$ $1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$
Pico cell Local Area → LOS	$PL=22\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c)$	$10m < d_{2D} < d'_{BP}$
	$PL=40\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} < 5000m,$ $h_{BS} = 10m,$ $1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$
Pico cell Local Area → NLOS	$PL=36.7\log_{10}(d_{3D}) + 22.7 + 26\log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$	$10m < d_{2D} < 2000m,$ $h_{BS} = 10m,$ $1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$

```

void
LteRxPower(gnsm::Ptr_t<User> user, gnsm::Ptr_t<LteEnb> ae, AntennaType_e
    ant, PropType_e prop)
{
    BEG;
    auto lteUe_ = user->GetLteDev();
    auto ueRxGain_ = lteUe_->GetConfiguration().GetRxGain();
    auto ueTxGain_ = lteUe_->GetConfiguration().GetTxGain();
    auto pl_ = ComputePathloss(ae->GetConfiguration().GetType(), user, ae,
        prop);
    for (auto& cell_ : ae->GetCells()) {
        auto cellTxGain_ = cell_->GetConfiguration().GetTxGain();
        auto cellRxGain_ = cell_->GetConfiguration().GetRxGain();
        auto antennaAtt_ = ComputeAntenna(cell_, ae->GetPosition(),
            user->GetPosition(), ant);
        auto rsrp_ = cell_->GetConfiguration().GetTxpowerPerRe();
        INFO("=====TxPowerPerRE", rsrp_.GetDbm(), "dBm");
        INFO("PATHLOSS", pl_, "dB");
        INFO("CellGain", cellTxGain_, "dB");
        INFO("UEgain", ueRxGain_, "dB");
        auto ulAtt_ = pl_ - ueTxGain_ - cellRxGain_ + CouplingLoss_c +
            antennaAtt_;
        auto totalAtt_ = pl_ + CouplingLoss_c + antennaAtt_ - cellTxGain_ -
            ueRxGain_;
        auto applicablePl_ = totalAtt_ // > MinCL_c ? totalAtt_ : MinCL_c;
        rsrp_.Att(applicablePl_);
        rsrp_ = rsrp_ > MaxRsRp_c ? MaxRsRp_c : rsrp_;
        if (rsrp_ < MinRsRp_c) {
            WARN("MAXCLfor", cell_);
            user->GetLteDev()->AddCellInfo(ae->GetId(), cell_,
                Power(units::dBW(TooLow_s)), units::dB(TooHigh_s),
                ae->GetConfiguration().GetType());
        } else {
            user->GetLteDev()->AddCellInfo(ae->GetId(), cell_, rsrp_,
                ulAtt_, ae->GetConfiguration().GetType());
        }
    }
    END;
}

```

Fig. 3.8. Acción para calcular la potencia recibida en el DL.

Para este cálculo, en primer lugar, se obtiene la información necesaria de cada usuario, almacenada en los archivos de configuración, y se calcula el valor del *pathloss* teniendo en cuenta el tipo de estación al que está conectado y la existencia de línea de visión (LOS) (3.2). A continuación, se itera el conjunto de estaciones base y, para cada una de las celdas que contienen dichas estaciones, se obtiene los datos necesarios de los archivos de configuración. También se calcula la atenuación de la antena teniendo en cuenta la posición de ésta y la del usuario. Una vez que se tienen todos los datos necesarios, se calcula la potencia recibida aplicando la Ecuación 3.1.

Esta información se almacena en dos vectores. En el primero se guarda para cada usuario, de forma decreciente según la potencia recibida, los identificadores de todas las celdas de las estaciones de las que recibe señal y el tipo de estación. En el segundo vector, se almacena la misma información para cada uno de los usuario pero ordenada de forma creciente en función del valor de pathloss obtenido. De esta forma la información está disponible para ser usada directamente por las diferentes políticas de selección de acceso. Además, se ha decidido guardar toda la información en lugar de únicamente la mejor a fin de realizar una implementación genérica que permita extensiones para escenarios en los que un usuario se pueda conectar a más de una celda.

3.3.3. Selección de celda en el Uplink

Una vez calculados los valores de potencia recibidos por cada uno de los usuarios, se pasa a seleccionar la celda a la que van a conectarse.

En primer lugar se calcula el número de *resource blocks* que el usuario necesita para satisfacer la demanda en función de los servicios activos. Para ello, se emplea la ecuación 3.3.

$$ResourceBlocks = \frac{Demanda}{BW_{Rb} * \log_2(1 + SINR_{objetivo})} \quad (3.3)$$

Donde:

- Demanda: es el tráfico ofrecido por los servicios activos.
- $SINR_{objetivo}$: 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 calcular la potencia que debe transmitir el usuario. Para este trabajo, se fija un valor de 5dB.
- BW_{Rb} : Es el ancho de banda por cada recurso, 180kHz.

Una vez obtenido el número de recursos necesarios, se llevan a cabo las diferentes implementaciones en función de la técnica empleada:

1º técnica: RSRP

El criterio de selección de celda es el siguiente:

$$CellID_{Serving} = \arg \max_i [RSRP_i] \quad (3.4)$$

Por esta razón, del primer vector obtenido en la anterior clase, *GetOrderedCellID1*, en el que se ha guardado, para cada usuario, información sobre las celdas ordenadas de forma decreciente

según la potencia recibida, se escoge la primera, que coincide con aquella de la que recibe un mayor valor de señal. Y, a continuación, se establece la conexión del usuario a dicha celda con la función *U1Connect*, generando el tráfico adecuado en función del número de *resource blocks* que el usuario necesita para satisfacer la demanda de los servicios activos (Figura 3.9).

```
void
UplinkConn::SelectRsrp(gnsm::Ptr_t<User>& user)
{
    BEG;
    auto nrbs_ = Nrbs(user);
    auto cellInfo_ = user->GetLteDev()->GetOrderedCellDl(0);
    auto cell_ = cellInfo_.m_cell;
    if (true) {cell_->AddU1User(user->GetId(), nrbs_);{
        user->GetLteDev()->U1Connect({cell_}, nrbs_);
        user->GetLteDev()->DlConnect({cell_},
            {Traffic(user->GetConnectionManager()->DlDemand()), nrbs_});}
    }
    END;
}
```

Fig. 3.9. Acción para selección de celda en el UL- técnica RSRP.

Así, en el enlace ascendente, cada usuario se conectará a aquella celda que proporciona un mayor valor de RSRP.

2º técnica: CRE

En este caso, el criterio de selección es el siguiente:

$$CellID_{Serving} = \arg \max_i [RSRP_i + bias_i] \quad (3.5)$$

donde *bias* es el desplazamiento/offset añadido para la selección celular, cuyo valor es 0 para macrocélulas y un valor configurable entre 3 y 20 dB para las picocélulas.

Para la selección de celda, al igual que en el caso RSRP, se escoge el primer vector, *GetOrderedCellDl*. Se itera dicho vector y se suma a los valores de potencia un offset positivo (*bias*) en función del tipo de celda, que son almacenados en un contenedor auxiliar. Una vez añadidos todos los valores en el contenedor, se itera para obtener el identificador de la celda con la que se obtiene el valor máximo de RSRP. Una vez obtenido dicho identificador, se establece la conexión del usuario a dicha celda en el enlace ascendente, función *U1Connect*, generando el tráfico adecuado en función del número de *resource blocks* que el usuario necesita para satisfacer la demanda de los servicios activos (Figura 3.10). Cabe mencionar que esta implementación, aun-

que se podía haber simplificado, se ha realizado de forma genérica para poder ser extendida a cosas en los que un usuario se pueda conectar a varias celdas de forma simultánea.

```
std::map<gns::Ptr_t<LteCell>,double> mapCell;
void
UplinkConn::SelectCre(gns::Ptr_t<User>& user)
{
    BEG;
    auto nrbs_ = Nrbs(user);
    auto info = user->GetLteDev()->GetOrderedCellsDl();
    for (auto& i : info) {
        auto rsrp = i.m_rsrp;
        if (i.m_type == EnbType::PICO) {
            rsrp.Amp(m_picoBias);
            mapCell[i.m_cell]=rsrp.GetDbw();
        } else if (i.m_type == EnbType::MACRO) {
            rsrp.Amp(m_macroBias);
            mapCell[i.m_cell]=rsrp.GetDbw();
        } else {
            rsrp.Amp(m_microbias);
            mapCell[i.m_cell]=rsrp.GetDbw();
        }
    }
    double max = std::numeric_limits<int>::min(); // -Infinito
    gns::Ptr_t<LteCell> cell=nullptr;
    std::map<gns::Ptr_t<LteCell>,double>::iterator p = mapCell.begin();
    while (p != mapCell.end() ) {
        if (p->second > max) {
            max=p->second;
            cell=p->first;
        }
        p++;
    }
    if (true) {cell->AddULUser(user->GetId(), nrbs_);{
        user->GetLteDev()->UlConnect({cell}, nrbs_);
        user->GetLteDev()->DlConnect({cell},{
            Traffic(user->GetConnectionManager()->DlDemand()), nrbs_});
        }
    }
    END;
}
```

Fig. 3.10. Acción para selección de celda en el UL- técnica CRE.

3º técnica: DUDe

En este caso, la selección de celda se basa en las pérdidas de propagación. Por ello, del segundo vector, *CellOrderedCellUl*, en el cuál se ha almacenado previamente los índices y potencias recibidas por cada celda, ordenadas de forma creciente en función del valor de pathloss obtenido, se escoge la primera, que coincide con aquella con la que se obtiene menos pérdidas de propagación. Y, a continuación, se establece la conexión del usuario a dicha celda con la función *UlConnect*, generando el tráfico adecuado en función del número de *resource blocks* que el usuario necesita para satisfacer la demanda de los servicios activos (Figura 3.11).

```
void
UplinkConn::SelectPl(gnsm::Ptr_t<User>& user)
{
    BEG;
    auto nrbs_ = Nrbs(user);
    auto cellInfo_ = user->GetLteDev()->GetOrderedCellUl(0);
    auto cell_ = cellInfo_.m_cell;
    if (true) {cell_->AddUlUser(user->GetId(), nrbs_); {
        user->GetLteDev()->UlConnect({cell_}, nrbs_);
        user->GetLteDev()->DlConnect({cell_},
            {Traffic(user->GetConnectionManager()->DlDemand()), nrbs_});}
    }
    END;
}
```

Fig. 3.11. Acción para selección de celda en el UL- técnica DUDe.

Así, en el enlace ascendente, el usuario se conectará a la que tiene que transmitir con menor potencia.

3.3.4. Control de potencia

Una vez creadas las *Acciones* para los diferentes esquemas de selección de acceso, se pasa a definir los diferentes mecanismos de control de potencia implementados para la realización de este trabajo.

1º mecanismo: Control de lazo abierto

Este mecanismo de control de potencia se define como:

$$PSD = P_0 + \alpha * PL[dB] \quad (3.6)$$

Donde:

- PSD es la densidad espectral de potencia transmitida.
- PL es la pérdida por propagación (*pathloss*) cuyo valor se obtiene de la *Acción* definida en el apartado 3.3.2.
- α es el factor de compensación de PL y que, está definido en el archivo de configuración del usuario.
- P_0 es un parámetro utilizado para controlar el objetivo de SNR para el enlace ascendente, el cuál se define como:

$$P_0 = SINR_{objetivo} + P_{ruido} \quad (3.7)$$

En la cuál:

- $SNR_{objetivo}$ está definido en el archivo de configuración del usuario, como ya se ha comentado en el apartado 3.3.3.
- P_{ruido} es la potencia de ruido y que, se obtiene mediante la siguiente función creada en la herramienta:

```
constexpr long double K_b = 1.38064852e-23;
constexpr double T = 293.15;
inline double
NoisePowerWatt(Bandwidth const& bw)
{
    return bw.GetHz() * K_b*T;
}
```

Fig. 3.12. Función para el cálculo de la potencia de ruido.

Para este cálculo, se itera el conjunto de celdas a las que el usuario se ha conectado en el enlace ascendente para obtener el valor del *pathloss* calculado anteriormente (Sección 3.3.2). También se obtiene el valor de α y $SNR_{objetivo}$, fijados en el archivo de configuración del usuario. Y, una vez obtenidos los datos necesarios, se calcula la densidad espectral de potencia transmitida (Ecuación 3.6).

```

void
UplinkPowSimple::PowerControl(gnsm::Ptr_t<User> u)
{
    BEG;
    units::dB ptl= units::dB(0.0);
    auto snrth = u->GetLteDev()->GetConfiguration().ULSinrTh();
    auto cellUlConn= u->GetLteDev()->GetUlConnList();
    for (auto& c : cellUlConn) {
        ptl = u->GetLteDev()->GetCellUl(c).m_pl;
    }
    double alpha=u->GetLteDev()->GetConfiguration().Getalpha();
    Power noise= Power(units::Watt(NoisePowerWatt(Bandwidth(LTE::RbBw_s))));
    Power Po=Power(units::Watt(noise.GetWatt()*Log2lin(snrth.RefVal())));
    Power PSD=Power(units::MilliWatt(Po.GetWatt()*std::pow(Log2lin(
    ptl.RefVal()),alpha)));
    u->GetLteDev()->UlSetPower(PSD);
    END;
}

```

Fig. 3.13. Acción mecanismo de control de potencia- *Open Loop Control (OLPC)*.

2º mecanismo: Sin control de potencia

Para la implementación de este esquema, la energía de transmisión es fija y la potencia del usuario se establece como $P = P_{max}$, donde P_{max} es la potencia máxima del usuario.

```

void
UplinkPowSimple::NoPowerControl(gnsm::Ptr_t<User> u)
{
    BEG;
    auto p0 = u->GetLteDev()->GetConfiguration().GetPmax();
    auto ulConInfo = u->GetLteDev()->GetUlConnInfo();
    auto ulConList = u->GetLteDev()->GetUlConnList();
    u->GetLteDev()->UlSetPower(Power(units::MilliWatt(p0.GetMilliWatt() /
    ulConInfo.m_rbs)));
    END;
}

```

Fig. 3.14. Acción mecanismo de control de potencia- *No Open Loop Control (NOPC)*.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez explicada la herramienta y las modificaciones que se han ido realizando a lo largo de todo el trabajo, se procederá a explicar los resultados obtenidos en los diferentes escenarios planteados.

Antes de analizar el comportamiento del sistema para las diferentes técnicas utilizadas, se muestra un resumen de la configuración principal de simulación siguiendo las recomendaciones del 3GPP [24]:

TABLA 4.1. CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN PARA ESTACIONES BASE.

Macro eNB	Cells num=3 Frequency= 2.1 GHz
Macro cell	NF= 2 dB Capacity= 100 Tx Power= 46 dBm Tx Gain= 14 dB Rx Gain= 14 dB
Pico eNB	Frequency= 3.5 GHz
Pico cell	NF= 2 dB Capacity= 100 Tx Power= 30 dBm Tx Gain= 5 dB Rx Gain= 5 dB

TABLA 4.2. CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN PARA USUARIOS.

LTE User	NF=6 dB Tx Gain= 0 dB Rx Gain= 0 dB $SINR_{objetivo} = 5 \text{ dB}$ $P_{MAX} = 250 \text{ mW}$
----------	---

Como se ha visto anteriormente, en el enlace ascendente, donde vamos a centrar la evaluación, la SINR viene dada como parámetro. Por lo tanto, la cantidad de recursos asignados a

cada usuario se puede calcular directamente a partir del tráfico cursado y de el valor de SINR. En concreto, en este estudio, asumimos que cada usuario cursa un tráfico de subida de 1Mbps.

Para las diferentes simulaciones que se han llevado a cabo, se ha creado un *script* en lenguaje de programación Perl que nos ha permitido realizar cambios de configuración y parámetros, sin tener que modificar el código manualmente.

4.1. Comparativa de técnicas de selección de acceso en función del escenario

En primer lugar, se realizará un breve análisis del comportamiento de las diferentes técnicas de selección de acceso para diferentes densidades de usuarios, centrándose en la mejora en la gestión de recursos del enlace ascendente. Para ello, se han creado dos escenarios diferentes: escenario 1 (homogéneo) y escenario 2 (heterogéneo). En el primer escenario, se han desplegado 7 estaciones macro y, en el segundo, 7 estaciones macro y 50 estaciones pico siguiendo los criterios de la Sección 3.3.1. Para ambos escenarios se realizan 100 experimentos independientes de cada escenario con diferentes densidades de usuarios.

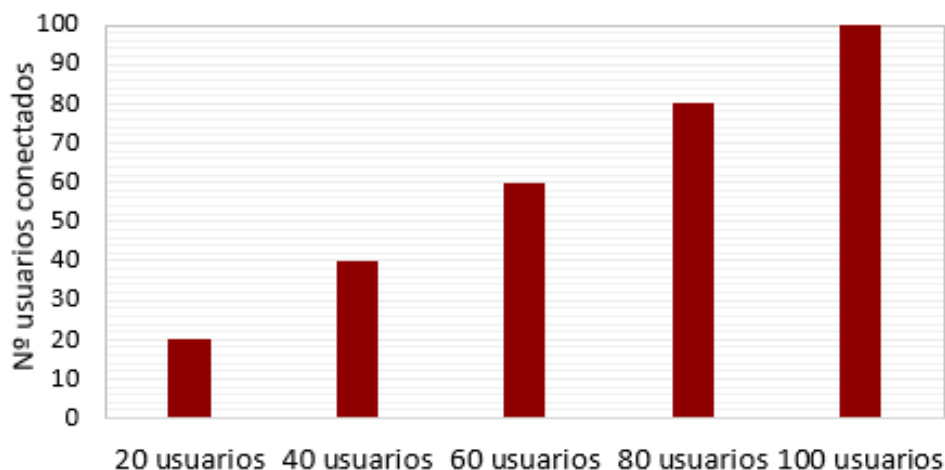


Fig. 4.1. Carga estaciones base-red homogénea.

En las redes homogéneas tradicionales, formadas únicamente por estaciones macro, la selección de celdas se basa en el criterio RSRP. En consecuencia, la celda seleccionada es aquella que proporciona un mayor valor de RSRP. Como se muestra en la Figura 4.1, el comportamiento del sistema es bastante previsible, de forma que las estaciones base se cargan de manera proporcional al número de usuario. Este escenario se ha utilizado como referencia con la que comparar las diferentes configuraciones de selección de acceso en redes heterogéneas.

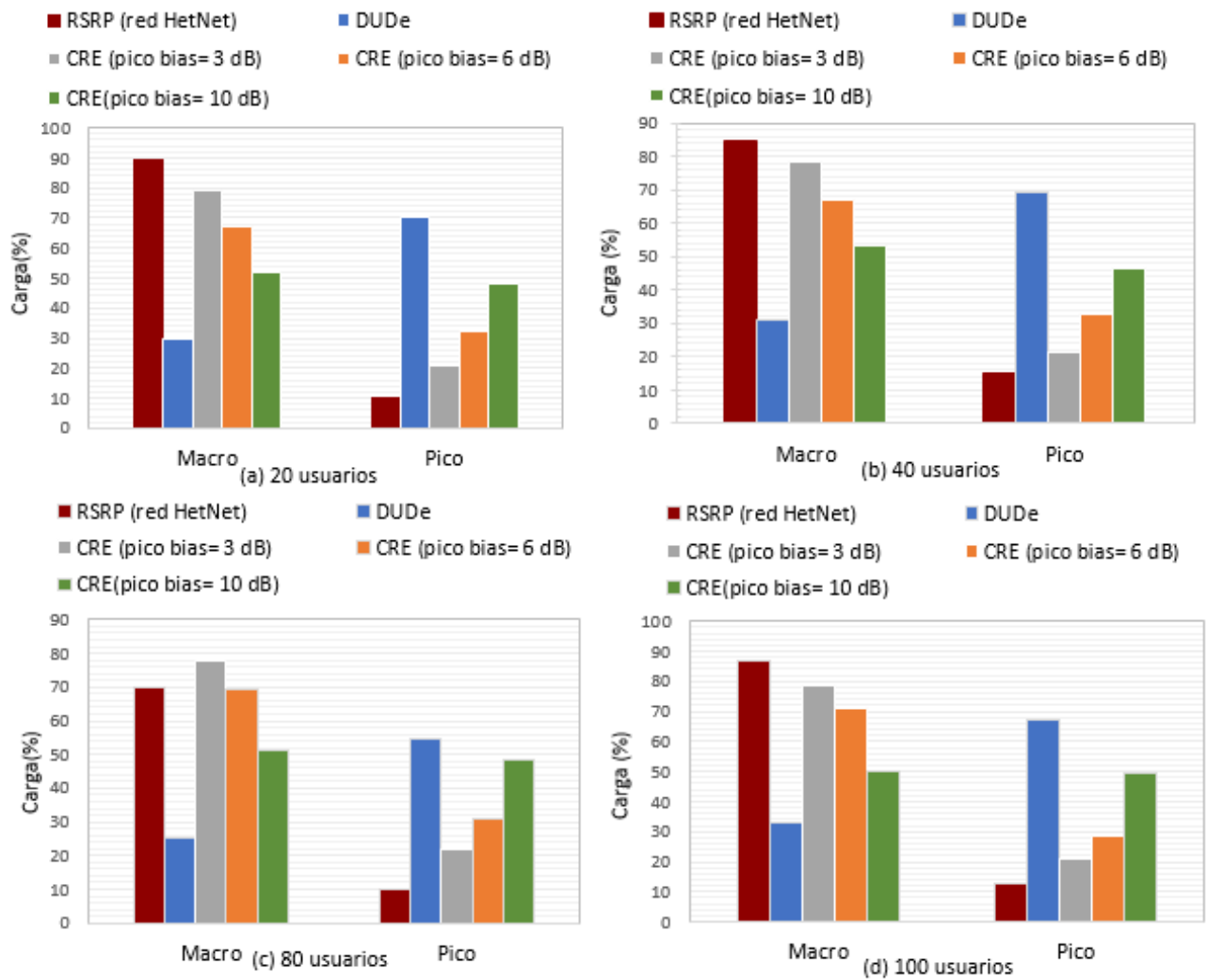


Fig. 4.2. Carga estaciones base-red heterogénea. La carga se mide como porcentaje de usuarios conectados.

Sin embargo, en una red HetNet, el uso de esta técnica provoca una reducción notable del rendimiento de la red ya que la mayoría de los usuarios se conectarán a las macro-cells, las cuáles generan mayor potencia de transmisión. Por esta razón, dichas estaciones podrían no ser capaces de atenderlos eficientemente, mientras que, en las small-cells, se estaría desaprovechando los recursos disponibles ya que pocos usuarios se conectarían a ellas, tal como podemos observar en la Figura 4.2.

Por esta razón, con el uso de las técnicas de acceso CRE y DUDe se incrementa la utilización de las small-cells optimizando la gestión de recursos. Analizando la Figura 4.2, en el caso de CRE, a medida que se aumenta el valor de *bias*, se aumenta de manera virtual el área de cobertura de las small-cells consiguiendo atraer más usuarios y, por lo tanto, el reparto de recursos es más equitativo. Mientras que, con DUDe, las small-cells cobran una relevancia mucho mayor, fundamentando aún más el reparto de carga optimizado. Esto se debe a que los usuarios

se conectan a aquella celda que proporciona menor *pathloss*, es decir, menos pérdidas de trayectoria. Por lo general, estas celdas son las small-cells, situadas alrededor de las macro-cells, y, por tanto, a menor distancia de los usuarios.

4.2. Comparativa de esquemas de control de potencia: sin control de potencia y control de potencia en lazo abierto (*Open Loop Control*) con diferentes valores de alpha

A continuación, se procederá a analizar el efecto de los diferentes mecanismos de control de potencia, desarrollados durante el trabajo, sobre cada una de las técnicas de selección de acceso: RSRP, CRE y DUDe, y topologías de red. Para ello, se presentarán diferentes escenarios en los que se realizan 100 experimentos independientes para obtener resultados más claros:

4.2.1. Técnica RSRP en redes homogéneas

En principio, se estudia el caso en el que se despliegan 100 usuarios de forma aleatoria en un escenario de 600x600 m², con 7 estaciones macro repartidas siguiendo un patrón hexagonal.

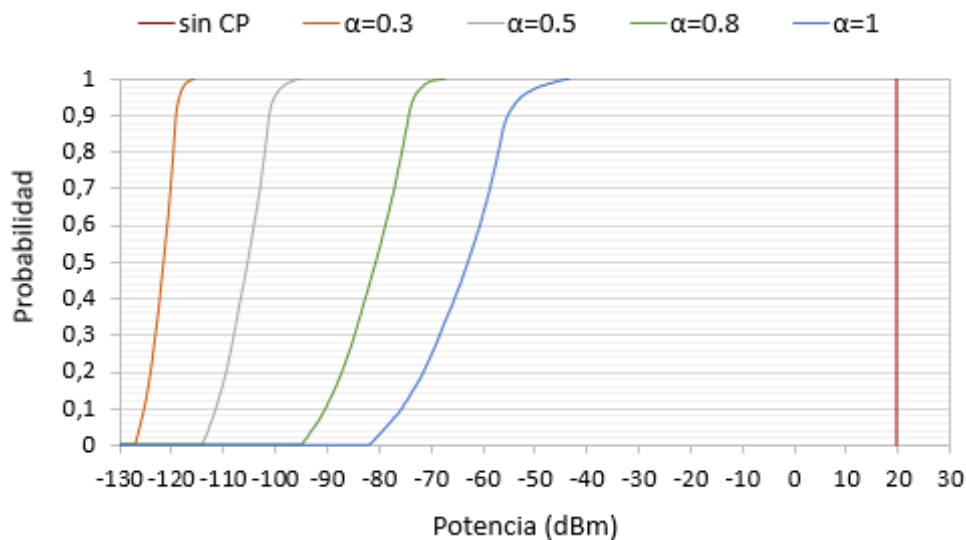


Fig. 4.3. Técnica RSRP en redes homogéneas.

En la Figura 4.3 se puede analizar el efecto del uso de la técnica RSRP con control de potencia en redes homogéneas. El caso en que no se aplica control de potencia todos los usuarios transmiten con la misma potencia lo que puede provocar un rendimiento diferente en función de la ubicación en la que se encuentren los usuarios dentro de la celda. Por otra parte, para valores de alfa entre 0 y 1, sólo se compensa una fracción de las pérdidas de propagación. La compensación permite al usuario transmitir con más potencia para eliminar dichas pérdidas de ruta, consiguiendo la compensación total de estas con un valor de $\alpha=1$. Como se puede

apreciar, el control de potencia juega un papel fundamental para alargar la vida de las baterías de los dispositivos de usuario, ya que, aún con la mayor compensación de pérdidas, la potencia transmitida es sustancialmente menor que aquella sin control de potencia.

4.2.2. Técnica CRE en redes heterogéneas

En este caso, se han fijado tres valores diferentes de *bias* sólo para las small-cells ya que el objetivo es conseguir desviar parte del tráfico de las macro-cells y, para ello, es necesario aumentar el área de cobertura de las estaciones más pequeñas.

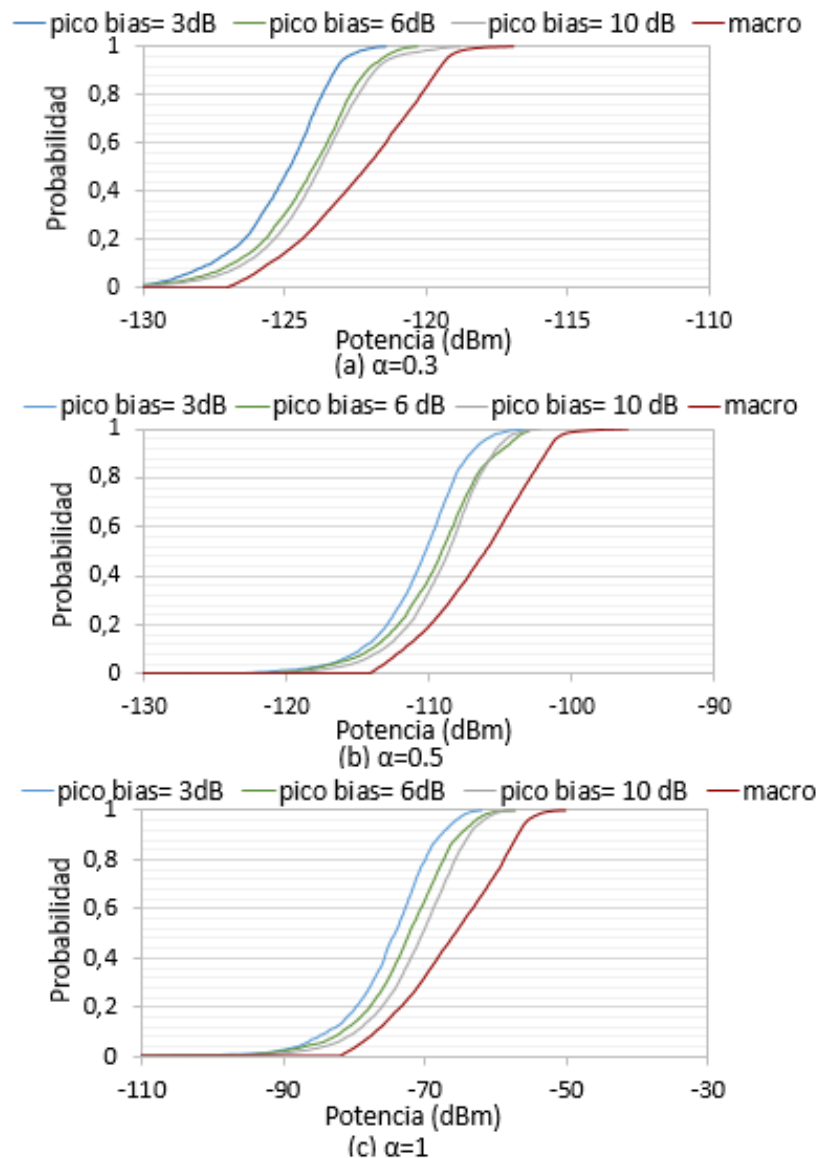


Fig. 4.4. Técnica CRE en redes heterogéneas.

Al igual que en el caso anterior, la Figura 4.4 muestra el comportamiento de la red apli-

cando la técnica CRE con control de potencia en un escenario HetNet. En el caso en que no se aplica control de potencia, todos los usuarios transmiten con la misma potencia, al igual que en la Figura 4.3. Sin embargo, en este apartado se ha omitido para poder visualizar mejor los resultados.

En el caso en que se aplica control de potencia, a medida que aumenta el valor de α , aumenta la potencia de transmisión de los usuarios, consiguiendo la máxima compensación del *pathloss* con $\alpha=1$. Por otro lado, con un valor de *bias* alto, más usuarios se conectarán a dichas estaciones sin embargo, habrá mayor interferencia para los usuarios situados en el borde de la small-cell desde la macro-cell. Por esta razón, para combatir dicha interferencia, el usuario tiene que aumentar la potencia de transmisión con el fin de lograr la SINR objetivo. Finalmente, tal como se puede ver en la Figura 4.4, las conexiones con las pico celdas requiere menor potencia que con las macro, debido a la menor distancia entre los usuarios y las celdas pequeñas.

4.2.3. Técnica DUDe en redes heterogéneas

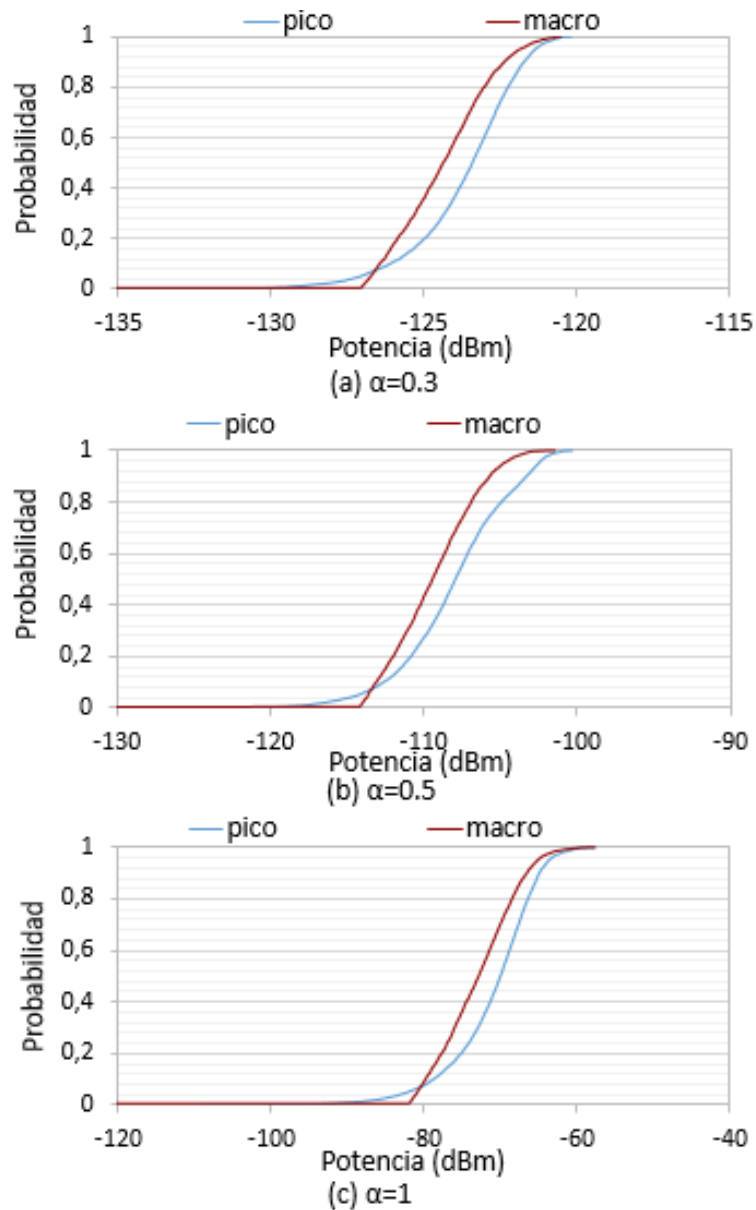


Fig. 4.5. Técnica DUDe en redes heterogéneas.

La Figura 4.5 muestra el efecto del control de potencia sobre la técnica DUDe aplicada en un escenario HetNet. También se ha omitido el caso en que no se aplica control de potencia, con el fin de poder visualizar mejor los resultados, ya que ocurre lo mismo que en las dos figuras anteriores. Como se puede observar, el uso de DUDe hace que la potencia necesaria para las conexiones con las macro y pico celdas tenga distribuciones más parecidas. Esto se debe a que DUDe usa únicamente como criterio las pérdidas de propagación, que, a su vez, es el parámetro usado para el control de potencia, lo cual es independiente del tipo de celda. Comparando las tres gráficas anteriores, se ve claramente que la menor potencia la tenemos con DUDE.

4.3. Comparativa de técnicas en escenarios heterogéneos

Por último, se realizará un breve análisis del comportamiento de las diversas técnicas de selección de celda en redes HetNet para diferentes densidades de pico celdas en función de potencia y carga de las estaciones base. Para ello, se crean diferentes escenarios en los que se despliegan 100 usuarios de forma aleatoria en un escenario de 600x600 m², con 7 estaciones macro repartidas por todo el cuadrado. Se realizan 100 experimentos independientes, en los que cada usuario es analizado durante una sola fotografía, desplegando un número distinto de estaciones pico (10, 30 y 50) y fijando el valor del factor de compensación de pérdidas a $\alpha = 1$, lo que significa que se compensan todas las pérdidas de propagación. A diferencia del análisis anterior, donde nos hemos centrado en la comparación con escenarios homogéneos tradicionales, en este caso el objetivo es la comparativa de las diferentes técnicas de selección de acceso.

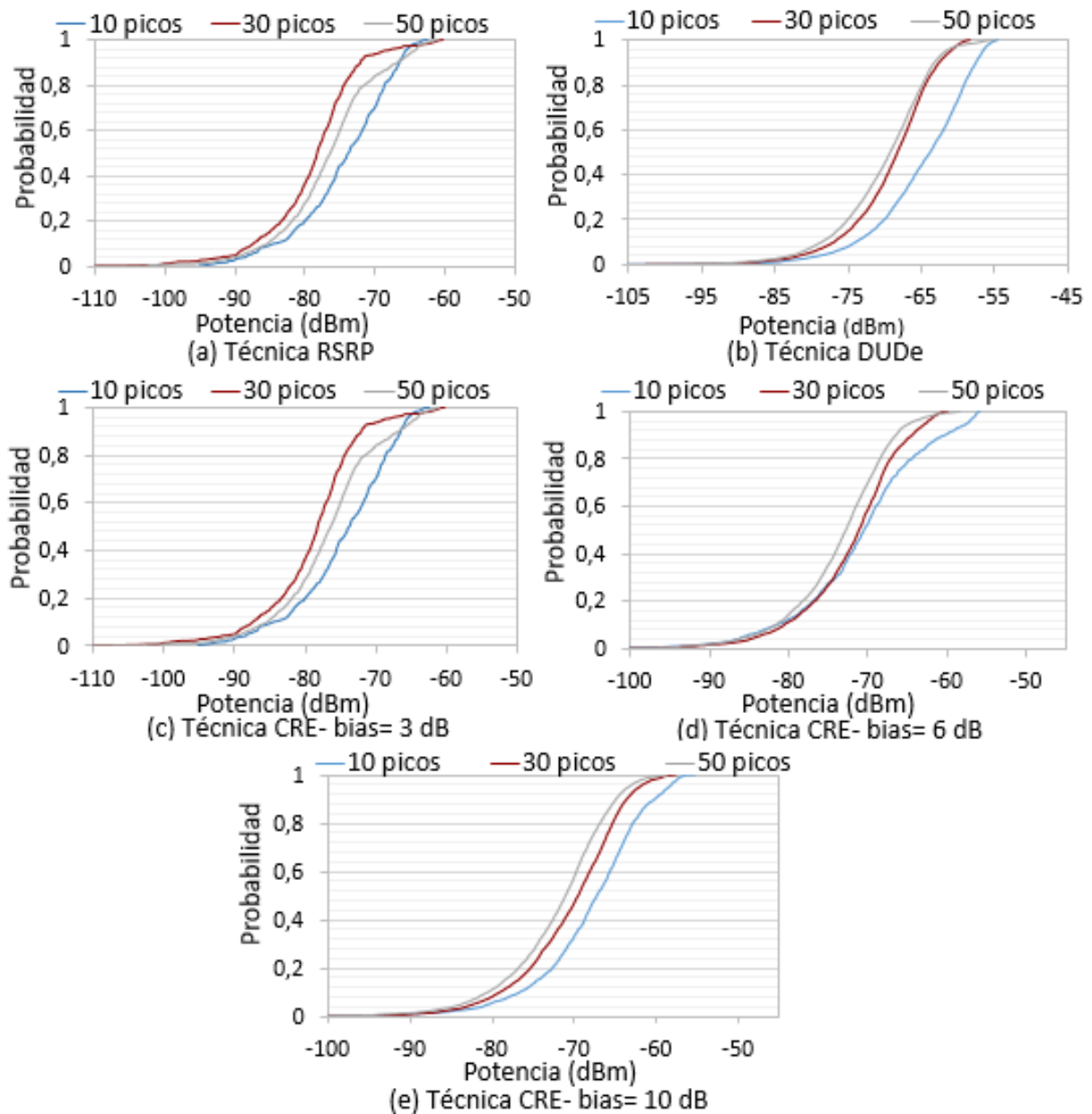


Fig. 4.6. Comportamiento de las técnicas de selección de acceso para diferentes valores de pico.

Los resultados mostrados en la Figura 4.6 arrojan un comportamiento interesante. De acuerdo a los resultados, la técnica DUDe no presenta la menor potencia transmitida, lo que es contradictorio con la propia definición de dicha técnica. Además, podemos observar que RSRP tiene un rendimiento en algunos casos mejor que las otras soluciones. La razón de este comportamiento es que con DUDe, y en menor medida con CRE, se cursan en mayor número de servicios por lo que se transmite con más potencia ya que se conectan más usuarios, mientras que con RSRP se tiran debido a que algunos usuarios necesitan transmitir con demasiada potencia, excediendo la potencia máxima, y se "tiran". Este efecto también se produce cuando se usa CRE, especialmente con valores de bias elevado.

En cuanto a la carga de las estaciones base, Figura 4.7, se puede observar como en el caso de RSRP, la mayoría de los usuarios se conectan a las estaciones macro ya que son las que proporcionan mayor valor de RSRP, a pesar del incremento del número de estaciones pico.

Respecto a la técnica DUDe, con un número elevado de estaciones pico, los usuarios se conectarán a dichas estaciones debido a su proximidad ya que proporcionan menores pérdidas de trayectoria. Sin embargo, con un número de estaciones pico pequeño, estas estarán más dispersas y, por lo tanto, el número de usuarios que se conectan a estas será menor.

Por último, en el caso de CRE, a medida que aumenta el número de estaciones, se consigue un reparto más equitativo de carga para el valor de *bias* más alto. Esto se debe a que, al aumentar el área de cobertura de las estaciones pico, estas small-cells atraerán más usuarios desviando así una parte del tráfico de las macro-cells. En definitiva, el uso más óptimo se consigue con la técnica DUDe ya que, como se ha mostrado en las gráficas anteriores, utiliza únicamente como criterio las pérdidas de propagación independientemente del tipo de celda y permite un reparto de carga más equitativo para densidades elevadas de estaciones pico.

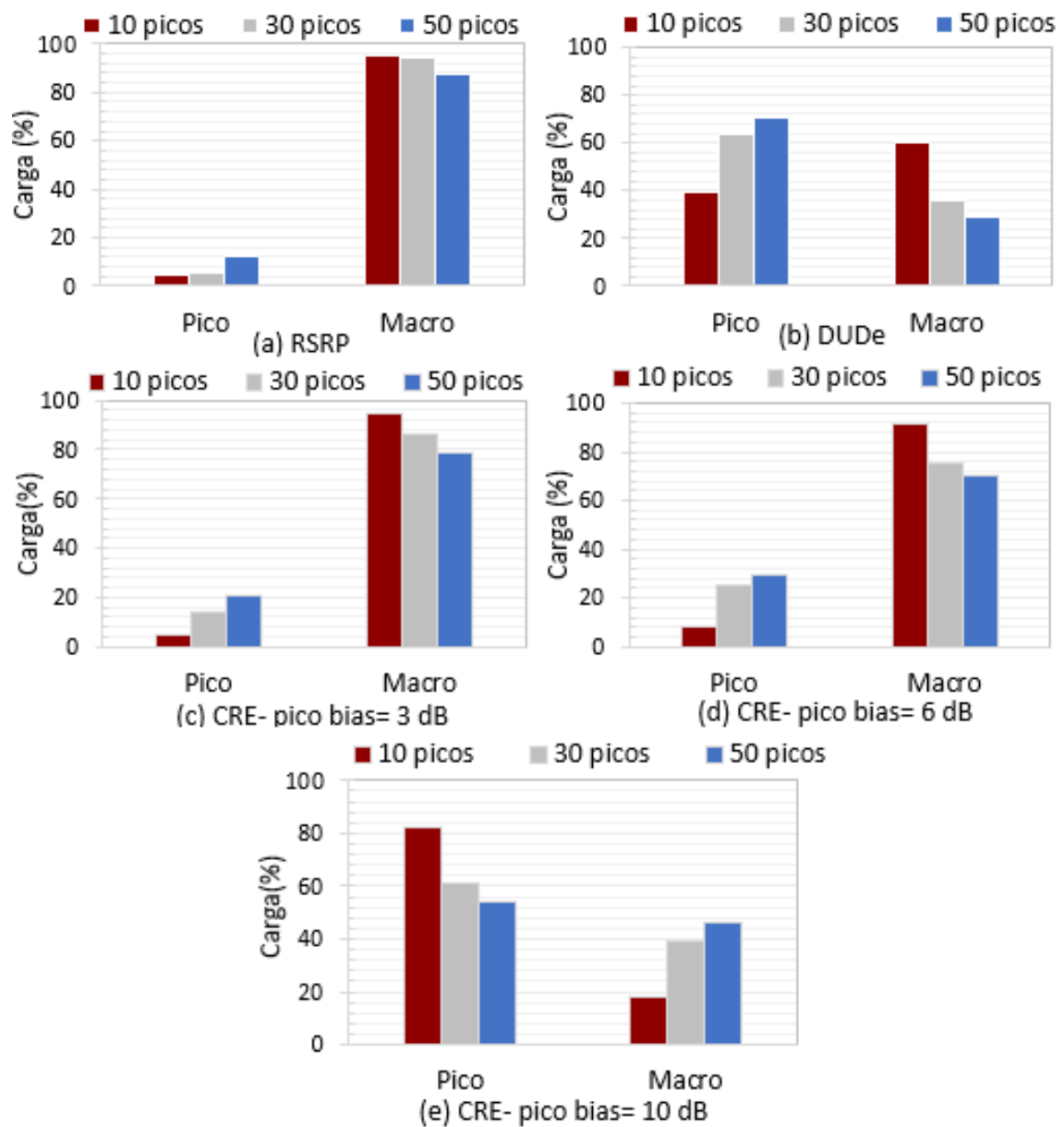


Fig. 4.7. Carga estaciones base para diferentes valores de pico. La carga se mide como porcentaje de usuarios conectados.

5. CONCLUSIONES

Durante la realización de este trabajo se han consolidado los conceptos más importantes de la tecnología LTE y sus potenciales capacidades de forma más precisa, desde su aparición en las tecnologías digitales móviles hasta la actualidad. Además, se han estudiado las ventajas que presentan el uso de diferentes técnicas en una red LTE con el objetivo de mejorar su rendimiento y capacidad.

Gracias al uso de la herramienta *GWNSyM*, la cuál se ha adaptado para la realización de este trabajo, se han realizado diversos despliegues HetNet con el fin de analizar las diferentes opciones que pueden aportar a una red LTE, realzando la influencia que el número de estaciones pico tiene en la misma y el balanceo de carga que se puede experimentar en las diversas estaciones desplegadas con el uso de diversas técnicas de selección de acceso.

En cuánto a los resultados obtenidos, se ha podido comprobar como la técnica de acceso RSRP no es la mejor opción para un despliegue HetNet ya que no se aprovecharían los recursos disponibles en las small-cells. Sin embargo, con el uso de técnicas como CRE y DUDe se ha visto como las small-cells cobran una mayor relevancia consiguiendo así un reparto de carga más equitativo. Asimismo, se han estudiado diferentes configuraciones de control de potencia, sobre las diferentes técnicas de selección de celda. Se ha podido comprobar que, a medida que aumenta el valor de compensación de pérdidas por propagación, se consigue un incremento de la potencia de transmisión de los usuarios. En el caso en que no se aplica control de potencia, todos los usuarios transmiten con la máxima potencia lo que provocará una disminución del rendimiento, especialmente para aquellos usuarios localizados en los bordes de las celdas, que se verán más afectados por la interferencia intercelular (ICI).

Por último, se ha analizado el comportamiento de las diferentes técnicas de selección teniendo en cuenta diferentes densidades de small-cells. De acuerdo a los resultados, se ha constatado que las técnicas tradicionales basadas en RSRP no son adecuadas para redes heterogéneas. Por otro lado, el uso de DUDe, proporciona un mejor rendimiento y permite explotar los recursos adicionales proporcionados por las small-cells. En un punto intermedio se encuentra la técnica CRE, que aunque mejora los resultados de las técnicas tradicionales, no proporciona el comportamiento óptimo. A modo de resumen, se ha constatado que el uso de la potencia de recibida como métrica para la selección de acceso no es la mejor opción de cara a mejorar la eficiencia en el enlace ascendente. En este sentido, el uso de las pérdidas de propagación permite alinear la técnica de selección de acceso con el control de potencia, dando lugar a un mejor rendimiento.

Durante el desarrollo de este trabajo, surgieron nuevas ideas de investigación atendiendo al trabajo expuesto en este proyecto, las cuáles se comentarán en el siguiente apartado.

5.1. Líneas futuras

En este apartado se presentan posibles líneas de investigación que pueden ser objeto de interés en el futuro:

- Estudio económico en función de la técnica de selección de celda utilizada: RSRP, DUDe y CRE, viendo si aportan beneficios a los operadores o generan gastos elevados.
- Estudio de otros mecanismos de control de potencia como el control de lazo cerrado (*Close Loop Control*) y comparar los resultados con la técnica utilizada en este proyecto (*Open Loop Control*).
- Extensión del estudio de rendimiento del enlace ascendente ante topologías novedosas, tales como device-to-device, en tanto de la técnica de selección de acceso como del control de potencia.
- Realizar de nuevo el análisis con simulaciones más realistas, teniendo en cuenta todos los factores que caracterizan a las comunicaciones móviles ya que algunos de ellos se han simplificado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] VIRGILIO ERNESTO REYES VÁSQUEZ, *Desarrollo de las tecnologías de cuarta generación en las comunicaciones móviles 4g*. Revista Científica, 2012, No. 13, p. 85-96.
- [2] REDES INALÁMBRICAS, *LTE (Long Term Evolution)*, UTP.
- [3] VARIOS AUTORES, *3GPP a Global Initiative, HetNet/Small Cells*, url <http://www.3gpp.org/hetnet>.
- [4] JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, *Redes heterogéneas. La solución para LTE*.
- [5] LTE ENCYCLOPEDIA, *Overview of the LTE Standard*, url <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>.
- [6] SERRANO LEON WENDY ALINE, CORTES PEREZ ROGELIO CHRISTIAN, VALDÉS HERNANDEZ SAMUEL MOISES, *Tesis: Estudio de OFDMA en el enlace de bajada en LTE*, Instituto politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Marzo 2015.
- [7] MORAY RUMNEY BSc, C. ENG, MIET, *3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA*, Lead Technologist, Agilent Technologies.
- [8] DRIOUCHE ABDERRACHID, HADJ SLIMANE NIHIL AMEL, AHMED ROUMANE *Étude des mécanismes de gestion de congestion dans la EUTRAN pour les applications M2M IoT (cas d'étude PRACH)*.
- [9] RAAD FARHOOD CHISAB, MEMBER IEEE AND PROF. (DR.) C. K. SHUKLA *Performance Evaluation of 4G-LTE-SCFDMA. Scheme under SUI and ITU Channel Models*
- [10] ABDUL SAMAD SHAIKH, KHATRI CHANDAN KUMAR, *Performance Evaluation of LTE Physical Layer Using SC-FDMA and OFDMA*, Blekinge Institute of Technology November 2010.
- [11] IHAB AHMED NAJM, MAHMOD ISMAIL AND GHASAN AKRAM ABED, 2014, *High-Performance Mobile Technology LTE-A using the Stream Control Transmission Protocol: A systematic Review and Hands-on Analysis*, Journal of Applied Sciences, 14: 2194-2218, URL <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2014.2194.2218>.
- [12] RADIO-ELECTRONICS.COM RESOURCES AND ANALYSIS FOR ELECTRONICS ENGINEERS, *LTE OFDM, OFDMA SC-FDMA & Modulation*,
- [13] ARNE SIMONSSON AND ANDERS FURUSKÄR *Uplink Power Control in LTE – Overview and Performance Principles and Benefits of Utilizing rather than Compensating for SINR Variations*, Wireless Access Networks, Ericsson Research.

- [14] BILAL MUHAMMAD, ABBAS MOHAMMED *Uplink Closed Loop Power Control for LTE System Performance evaluation with the open loop error, TPC command delay and power headroom reporting*, COMSATS Institute of IT, Abbottabad Campus Pakistan, Blekinge Institute of Technology Sweden.
- [15] YI LI, XIAODONG XU, JIANG HAN, WEN LIU, *Coordinated Inter-Cell Interference Management for Expanded Region Picocells in Heterogeneous Network*, Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China.
- [16] JIANGUO LIU, DONGYAO WANG, JUN WANG, JING LI, JIYONG PANG, GANG SHEN, QI JIANG, HUAN SUN, YAN MENG, *Uplink power control and Interference Coordination for Heterogeneous Network*, Research and Innovation Center ,Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd Shanghai, 201206, P. R. China.
- [17] XIANZHONG SUI , ZHIFENG ZHAO , RONGPENG LI AND HONGGANG ZHANG *Energy Efficiency Analysis of Heterogeneous Cellular Networks with Downlink and Uplink Decoupling* Dept. of Information Science and Electronic Engineering Zhejiang University, Zheda Road 38, Hangzhou 310027, China.
- [18] 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*.
- [19] LUIS DIEZ, SERGIO IZUEL, RAMÓN AGÜERO, *Generic Wireless Network System Modeler: Fostering the Analysis of Complex LTE Deployments*, url https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-52712-3_10
- [20] JUAN JOSÉ MURILLO FUENTES, *Tema 9. SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES MÓVILES, Radiación y Radiocomunicación 4º Ingeniería de Telecomunicación*, DTSC. ETSI. Univ Sevilla.
- [21] 3GPP TR 25.951 V6.2.0, *FDD Base Station (BS) classification*.
- [22] 3GPP TR 25.942 V6.4.0, “*Radio Frequency (RF) system scenarios*”.
- [23] 3GPP TR 36.873 V12.2.0, *Study on 3D channel model for LTE* , junio 2015.
- [24] 3GPP TR 25.814 V7.1.0 (2006-09) , *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7)*.