

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



***Trabajo Fin de Grado***

**USO DE UPLINK/DOWNLINK  
DECOUPLING EN REDES LTE PARA  
MEJORAR LA EXPOSICIÓN A CAMPOS  
ELECTROMAGNÉTICOS**

**(On the use of Uplink/Downlink decoupling  
over LTE networks to reduce the exposure  
to electromagnetic fields)**

Para acceder al Título de  
***Graduado en***  
***Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Santiago Temes Jiménez

Octubre - 2015



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

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por: Santiago Temes Jiménez**

**Director del TFG: Ramón Agüero Calvo**

**Título: “Uso de Uplink/Downlink decoupling en redes LTE para  
mejorar la exposición a campos electromagnéticos”**

**Title: “On the use of Uplink/Downlink decoupling over LTE networks  
to reduce the exposure to electromagnetic fields “**

**Presentado a examen el día: 29 de octubre del 2015**

para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### Composición del Tribunal:

Presidente (Beivide Palacio, Julio Ramón):

Secretario (García Gutiérrez, Alberto Eloy):

Vocal (Agüero Calvo, Ramón):

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)

# ÍNDICE

- **Resumen y Abstract**
- **Capítulo 1 - Introducción**.....pag.1
- **Capítulo 2 - Aspectos teóricos de LTE**.....pag.3
  - 2.1 Introducción a LTE.....pag.3
  - 2.2 Evolución de los sistemas móviles.....pag.4
    - 2.2.1 Redes celulares
    - 2.2.2 Historia de las comunicaciones móviles digitales
  - 2.3 Características de LTE.....pag.8
    - 2.3.1 Características Base
    - 2.3.2 Modulación OFDM, OFDMA y SC-FDMA
    - 2.3.3 Arquitectura del sistema LTE
    - 2.3.4 Técnicas MIMO
  - 2.4 Desacoplamiento del enlace ascendente y descendente...  
.....pag.16
    - 2.4.1 Introducción a DUDe
    - 2.4.2 Razonamiento de la utilización de técnicas DUDe
- **Capítulo 3 – Herramienta**.....pag.21
  - 3.1 Introducción a la herramienta.....pag.21
  - 3.2 Composición de la herramienta.....pag.21
    - 3.2.1 Archivo de configuración
    - 3.2.2 Trazas
    - 3.2.3 Escenarios
    - 3.2.4 Tipos
    - 3.2.5 Parámetros
  - 3.3 Módulos.....pag.25
    - 3.3.1 Enlace descendente
    - 3.3.2 Enlace ascendente
    - 3.3.3 Clases comunes
- **Capítulo 4 – Resultados**.....pag.34
  - 4.1 Planteamiento escenarios.....pag.34
  - 4.2 Resultados iniciales para un escenario con despliegue de usuarios aleatorio.....pag.36
    - 4.2.1 Enlace descendente
    - 4.2.2 Enlace ascendente
    - 4.2.3 Comparación de resultados, cargas por estación y servicios.
  - 4.3 Evaluación de resultados avanzados en el enlace ascendente.....  
.....pag.52

- **Capítulo 5 – Conclusiones**.....pag.66
  - 5.1 Conclusiones del proyecto.....pag.66
  - 5.2 Líneas futuras.....pag.67
- **Bibliografía**

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

- 2.1. Esquema de la evolución de los sistemas móviles.
- 2.2. Diferenciación enlaces ascendentes y descendentes.
- 2.3. Esquema de la arquitectura LTE.
- 2.4. Esquema de transmisión DUDe habitual.
- 3.1. Funcionamiento de la herramienta.
- 4.1. Potencia en W recibida por usuario activo.
- 4.2. CDF Potencias recibidas por usuario activo.
- 4.3. CDF de la SINR en dBW por usuario activo.
- 4.4. CDF de la eficiencia (bits/s/Hz) por usuario activo.
- 4.5. CDF del número de Resource Blocks por usuario activo.
- 4.6. Potencias emitidas por las estaciones en W.
- 4.7. CDF de las potencias emitidas por las estaciones en W
- 4.8. CDFs de las SINRs en dB por usuario activo, con y sin DUDe.
- 4.9. CDFs de las eficiencias espectrales (bits/s/Hz) por usuario activo, con y sin DUDe.
- 4.10. CDFs de los Resource Blocks necesarios por usuario activo, con y sin DUDe.
- 4.11. Potencias emitidas en W por usuario activo, con y sin DUDe.
- 4.12. CDFs de las potencias emitidas en W por usuario activo, con y sin DUDe.
- 4.13. Media de potencias emitidas en W por los usuarios activos, con y sin DUDe.
- 4.14. CDF Potencias emitidas por los usuarios activos, con y sin DUDe.
- 4.15. Comparación en media de la SINR de bajada, y subida, con y sin DUDe.
- 4.16. CDF SINR del enlace ascendente, con y sin DUDe, y descendente.
- 4.17. Comparación en media de la eficiencia espectral (bits/s/Hz) de bajada, y subida, con y sin DUDe.
- 4.18. CDF eficiencia espectral (bits/s/Hz) de bajada, y subida, con y sin DUDe.
- 4.19. Comparación en media de Resource blocks utilizados en bajada y subida (con y sin DUDe).
- 4.20. CDF de Resource blocks utilizados en bajada y subida (con y sin DUDe).
- 4.21. Reparto de carga media por estaciones en el enlace descendente y ascendente sin DUDe.

- 4.22. Reparto de carga media por estaciones en el enlace ascendente con DUDe.
- 4.23. Número de servicios de tipos 1 y 2 activos en la red.
- 4.24. Media de servicios activos de tipo 1 y 2.
- 4.25. CDFs de servicios cursados y perdidos por grupo de 50 usuarios.
- 4.26. Comparación servicios activos en macro y micro estaciones.
- 4.27. CDFs Servicios en macro y micro estaciones, con y sin DUDe.
- 4.28. Evolución de la SINR, en dBW, en función del número de estaciones, con y sin DUDe, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.
- 4.29. Comparación de SINR en dBW entre usuarios por número de estaciones.
- 4.30. Evolución de la eficiencia espectral en función del número de estaciones, con y sin DUDe, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.
- 4.31. Comparación de eficiencia espectral entre usuarios en función del número de estaciones
- 4.32. Evolución del número de Resource Blocks en función del número de estaciones, con y sin DUDe, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.
- 4.33. Comparación del número de Resource Blocks entre usuarios en función del número de estaciones.
- 4.34. Evolución de la potencia emitida por usuario en función del número de estaciones, con y sin DUDe, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.
- 4.35. Comparación de la potencia emitida por los usuarios en función del número de estaciones
- 4.36. Carga media por estación para 100 usuarios; 10 20 y 30 micro estaciones.
- 4.37. Carga media por estación para 200 usuarios; 10 20 y 30 micro estaciones.
- 4.38. Número de servicios activos de tipo 1 y 2.
- 4.39. Número de servicios perdidos.
- 4.40. Servicios activos en la macro y micro estaciones, con y sin DUDe.

## **ÍNDICE DE TABLAS**

- 2.1 Requerimientos del Rel-8 de LTE.
- 2.2 Comparación número de RB dependiendo del ancho de banda.
- 3.1 Modelos del pathloss en áreas urbanas.
- 3.2 Valores típicos del MCL.
- 4.1 Características de los servicios utilizados.
- 4.2 Posición de las micro estaciones en el escenario.

## **RESUMEN**

Las comunicaciones inalámbricas digitales están en constante evolución, lo que plantea la necesidad de la utilización de nuevas técnicas que mejoren los servicios que se ofrecen a los usuarios. Por ello, este proyecto plantea la aparición de la tecnología LTE y el aprendizaje de sus características, de cara a la posible aplicación de técnicas que mejoren sus capacidades. Para ello se plantean escenarios alternativos en los que se estudiarán los resultados en los enlaces ascendentes, realizando una comparación con las soluciones tradicionales. La técnica empleada se denomina DUDe (Downlink/Uplink Decoupling), y permitirá el establecimiento de conexiones con estaciones base diferentes de las utilizadas en el enlace descendente.

Este estudio se realizará elaborando una herramienta de simulación, mediante la que se desplegarán usuarios, estaciones y servicios en un área; observando y comparando su comportamiento para un posterior análisis, llegando a conclusiones que argumentarán la utilización de esta técnica en las diferentes situaciones planteadas.

Por último, destacar que este trabajo forma parte de un marco de investigación en el que ha participado el Grupo de Ingeniería Telemática dentro de un proyecto europeo denominado LEXNET (Low EMF Exposure Networks), que tiene como principal objetivo elaborar posibles soluciones para reducir la exposición que sufren los usuarios ante los campos electromagnéticos producidos por las redes inalámbricas.

## **ABSTRACT**

Digital wireless communications are constantly evolving, raising the need for the use of new techniques in order to improve the services offered to users. Therefore, this project proposes the emergence of the LTE technology and the learning of its characteristics, facing the possible application of techniques that enhance its capabilities. To do so, there are alternative scenarios in which the results in the uplinks would be studied, making a comparison with traditional solutions. The technique is called DUDe (Downlink / Uplink Decoupling), and it would allow the establishment of connections with different base stations from those used in the downlink.

This study is made by making a simulation tool, by which users, stations and services would be deployed in an area; observing and comparing their behaviour to further analysis, reaching conclusions that would argue the use of this technique in different posed situations.

Finally, it is worth noting that this paperwork is part of a research framework in which the Group of Telematics Engineering participated within a European project called LEXNET (Low EMF Exposure Networks), which primarily aims to develop possible solutions to reduce the exposure suffered by the users to the electromagnetic fields produced by wireless networks.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo de este trabajo es comprobar que la utilización de técnicas DUDe (Downlink and Uplink Decoupling) en un despliegue de red LTE aporta mejoras al comportamiento de la red y de los usuarios. Estas mejoras pueden verse como la obtención de canales ascendentes no habituales, ya que el usuario se conecta a una estación diferente a la elegida para el enlace descendente. Estos enlaces tendrán mejores prestaciones que los habituales, pues se realizarán, principalmente, con estaciones más cercanas, obteniendo así mayores SINRs y eficiencias, repartiendo más equitativamente la carga y reduciendo la potencia necesaria para transmitir.

Para afrontar este objetivo final, es necesario abordar varios pasos previos, que se describen seguidamente.

- Entender el funcionamiento de las redes LTE, así como su composición y sus diferentes características.
- Plantear las diferencias entre los canales ascendentes y descendentes, y argumentar la utilización de DUDe en este tipo de redes.
- Entender y desarrollar la herramienta que se utilizará para el despliegue de las redes y usuarios, implementando los módulos necesarios.
- Obtener diferentes resultados que permitan comparar el comportamiento de los enlaces descendentes con los ascendentes y, principalmente, el uso de DUDe frente a LTE tradicional.
- Analizar dichos resultados mediante gráficas, para lograr una mejor comprensión y explicación de lo obtenido.

En base a ello, esta memoria se ha estructurado en varios capítulos. Primeramente se introducirá la tecnología LTE, indicando la evolución histórica de las comunicaciones móviles digitales hasta llegar a la actualidad, con LTE en pleno auge. A su vez, se indicarán las principales características de este estándar, poniendo énfasis en sus aspectos fundamentales, tales como las diferentes modulaciones de los enlaces ascendentes y descendentes, la arquitectura básica de la red estándar y el uso de técnicas MIMO que, unidas a las anteriores mejoras, sitúan a LTE como una tecnología útil y eficaz, que proporciona a los usuarios lo necesario para poder dar respuesta a la demanda de los servicios.

Una vez se tenga una idea clara de lo que LTE representa y sus potenciales capacidades, se procederá a explicar las técnicas DUDe, y las opciones y mejoras que podría aportar a esta tecnología, proporcionando argumentos que posteriormente se tratarán de fundamentar.

Se comenzará con la explicación de la herramienta utilizada para crear los escenarios y realizar el despliegue de usuarios, estaciones y servicios sobre un

área, en la cual se procederá a analizar múltiples factores, determinantes en las comunicaciones móviles de LTE.

Se indicarán las características de dicha herramienta, y la programación realizada para poder llegar a los resultados requeridos, con los que se podrá comparar DUDe con LTE tradicional, resaltando las ventajas de esta técnica. Para ello se proporcionarán diferentes parámetros y fórmulas propias de LTE y de DUDe, razonando su utilización en el escenario utilizado.

Por último, se procederá al análisis de las estaciones y servicios empleados, analizando su repercusión en el entorno de trabajo y el efecto de las técnicas mencionadas sobre ellos, obteniendo así mejoras en el reparto de carga, distribuciones más eficientes de los servicios, etc.

En las conclusiones se expondrán los resultados finales y lo aprendido tras la elaboración del proyecto, así como las posibles investigaciones que se podrían realizar a partir de lo aquí obtenido.



## **CAPÍTULO 2. ASPECTOS TEÓRICOS DE LTE**

### **2.1 Introducción a LTE**

Es sabido que el uso de los terminales móviles ha crecido exponencialmente estos últimos años; el desarrollo de nuevas aplicaciones y la utilización de servicios que antes eran inimaginables, ha hecho que incremente notoriamente la demanda de tráfico de datos y que se requieran mayores velocidades y mejores prestaciones por parte de las propias redes. Todo ello encaminó a la organización 3GPP (3rd Generation Partnership Project), que actualmente mantiene GSM y UMTS, al desarrollo de LTE.

LTE significa Evolución a Largo Plazo (Long Term Evolution). Es un estándar de comunicaciones móviles que cambia notablemente los sistemas existentes. Esta tecnología de transmisión de datos de banda ancha inalámbrica está principalmente diseñada para poder dar soporte al acceso continuado de teléfonos móviles y de dispositivos portátiles a Internet.

Surgió para cubrir, principalmente, las siguientes necesidades:

- El requerimiento por parte de los usuarios de una conexión de datos con mayor capacidad y calidad.
- La petición por parte de los fabricantes y operadores de un estándar menos complejo, que permita reducir los costes.
- Asegurar la compatibilidad del 3G en el futuro.

El interfaz radio (nivel físico) del sistema LTE es completamente novedoso, pudiendo calificar a LTE como una nueva generación con respecto a UMTS (tercera generación o 3G) y a GSM (segunda generación o 2G). Es común referirse a LTE como la tecnología utilizada en los terminales móviles de cuarta generación, los denominados 4G, para la subida y bajada de datos desde Internet. En realidad los terminales 4G usan LTE Advanced, que surge a partir de esa tecnología pero es más avanzada.

La arquitectura del sistema LTE está basada completamente en IP y está diseñada para dar un soporte eficiente a las transmisiones basadas en paquetes; estos sistemas están formados por dos componentes principales: E-UTRAN y EPC.

## **2.2 Evolución de los sistemas móviles**

Para llegar a entender la tecnología LTE y el porqué de su existencia hay que conocer la historia de las comunicaciones móviles y su evolución, para lo cual se explicará lo que es una red móvil y su operación.

### **2.2.1 Redes Celulares**

La red móvil o celular se estructura como una malla de células que abarcan diferentes áreas de cobertura, disponiendo cada una de ellas de una estación base. En función del tamaño de las células, la red móvil se adapta a la demanda de tráfico de los usuarios y optimiza su cobertura. Así, estas se clasifican en función del área que cubren en: macrocélulas (con cobertura de 2-20 km adaptada a áreas rurales), microcélulas (500 m-2 km para zonas urbanas), picocélulas (para calles o edificios) y las más recientes femtocélulas (son pequeñas estaciones base diseñadas para ampliar la cobertura en interiores, viviendas, edificios o en algunas empresas, generalmente utilizando las líneas de acceso de banda ancha de los usuarios). El proceso que garantiza que el usuario pueda mantener su comunicación cuando se mueve, cruzando áreas de cobertura, se denomina handover y las propias estaciones base son las encargadas de gestionarlo.

Dado el gran número de usuarios de los sistemas móviles y el espectro disponible, la reutilización de frecuencias es indispensable y, para garantizar que no haya interferencias en la comunicación, se debe gestionar el ancho de banda disponible. Para ello, se adoptan distintas estrategias: se reparte el tiempo de transmisión entre los usuarios de un mismo canal (GSM), pueden utilizarse diferentes códigos de acceso (UMTS) o, finalmente, repartirse simultáneamente la cantidad de frecuencias y el tiempo de transmisión (LTE).

### **2.2.2 Historia de las comunicaciones móviles digitales**

En la historia de las comunicaciones móviles, los estándares utilizados han ido evolucionando dando lugar a distintas generaciones hasta llegar a la que actualmente está en claro desarrollo, el 4G, que utiliza como base la tecnología LTE.

Las redes analógicas de telefonía móvil (1G), habían sido introducidas en Europa a finales de 1980 y no eran compatibles entre sí. Posteriormente la revolución de la tecnología digital celular comenzó con la introducción del GSM (2G), originariamente denominado Groupe Spécial Mobile y posteriormente conocido como Global System for Mobile communications, cuya especificación se comienza a perfilar tras la conferencia de telecomunicaciones CEPT en 1982.

GSM está basado en el acceso múltiple por división en tiempo (TDMA) y es capaz de soportar servicios de datos de hasta 9.6 kbps; se puede decir que los primeros servicios de datos introducidos en 2G fueron los mensajes cortos (SMS). A principios de 1990 aparece en Estados Unidos el estándar IS-95, basado en el acceso múltiple por división en código (CDMA), que ofrecía velocidades de datos de hasta 14.4 kbps y mejoraba la eficiencia espectral con respecto al sistema GSM.

Estas tecnologías fueron evolucionando con el tiempo, ofreciendo mejores velocidades y mejorando la eficiencia espectral. En 1997 se estandarizó GPRS, servicio general de paquetes vía radio, cuya característica es que está basado en la conmutación de paquetes en lugar de la conmutación de circuitos usada por GSM, permitiendo velocidades de datos teóricas de 171.2 kbps, aunque en la práctica no superaban los 56 kbps en bajada. Puesto que esta tecnología se encuentra a medio camino entre la segunda y la tercera generación, se le denomina 2.5 G.

Sin embargo, GPRS presentaba muchas carencias. Por ejemplo no existía la posibilidad de navegar en itinerancia, pues era necesario conectarse de nuevo después de cada desconexión de red.

Aparece por tanto EDGE, (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), también conocida como EGPRS (Enhanced GPRS), que actúa como puente entre las redes 2G y 3G, considerándose como una evolución del GPRS. Los beneficios de EDGE sobre GPRS se pueden ver en las aplicaciones que requieren una velocidad de transferencia de datos elevada, como vídeo y otros servicios multimedia. EDGE, o EGPRS, puede utilizarse en cualquier transferencia de datos basada en conmutación por paquetes.

A finales de 1998 surgió el grupo 3GPP, encargado de definir el estándar de banda ancha CDMA (WCDMA) el núcleo de red evolucionado de GSM, originando la tercera generación (3G) o UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), el cual usa una comunicación terrestre basada en una interfaz de radio W-CDMA, conocida como UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA). Soporta duplexado por división de tiempo (TDD) y por división de frecuencia. En ambos casos se consiguen velocidades teóricas de hasta 2 Mbps. Se puede decir que UMTS es la primera tecnología de Banda Ancha móvil.

Sus tres grandes características son sus capacidades multimedia, una velocidad de acceso a Internet elevada, que le permite transmitir audio y video en tiempo real, y una transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas. Además, dispone de una gran variedad de servicios.

Este sistema, empleado por los móviles y dispositivos de acceso de tercera generación (3G), mejoró sustancialmente las prestaciones de GSM en transmisión de datos, permitiendo una mayor eficiencia y una velocidad máxima

de transmisión de datos por usuario de 384 kbps. Asimismo, la tecnología 3G ha cambiado radicalmente la concepción del móvil, que ha pasado a ser un terminal, compatible con todo tipo de servicios multimedia interactivos y nuevas aplicaciones de banda ancha, tales como servicios de videoconferencia o los basados en el acceso a Internet.

Las tecnologías 3G se implantaron en una nueva banda a nivel mundial (2.1 GHz) y se clasifican dentro de un único estándar global IMT-2000 de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

En la actualidad, existen evoluciones del UMTS (3.5 G), como son el HSDPA, HSUPA y el HSPA+ (3.75 G), que ofrecen una mejor conexión de banda ancha móvil. El término HSPA engloba tanto a HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) como a HSUPA (High Speed Uplink Packet Access); esto es, hace referencia al acceso de paquetes de alta velocidad, tanto en enlaces ascendentes como descendentes. Estos estándares fueron definidos en la versión 5 de las especificaciones del 3GPP, como un servicio de paquetes de datos de alta velocidad con valores teóricos máximos de 14 Mbps y 5 Mbps para enlaces descendentes y ascendentes, respectivamente, aunque en las primeras implementaciones las velocidades reales se situaron entre 1 y 4 Mbps.

Una de las ventajas de esta especificación es que la misma señal portadora puede dar servicio simultáneamente a usuarios de voz y datos UMTS, así como a usuarios de datos HSDPA, con una latencia relativamente baja (unos 70 ms).

Las evoluciones técnicas más importantes con respecto a UMTS son:

- Enlaces compartidos de alta velocidad e intervalos de transmisión cortos.
- Planificación y gestión rápida de recursos y diversidad de usuarios.
- Modulaciones de mayor eficiencia, como por ejemplo 16 QAM.
- Enlaces de adaptación rápida, en función de las condiciones del canal.

Por último aparece HSPA+, que se corresponde con la versión 7 del estándar de comunicaciones 3GPP, que surgió con la intención de explotar el potencial de los enlaces CDMA, antes de utilizar definitivamente sistemas basados en OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), para alcanzar rendimientos similares a los de LTE (Long Term Evolution) en canales de 5 MHz, y para facilitar la interoperabilidad y transición entre HSPA+ y LTE, permitiendo la transmisión de VoIP y asegurando la compatibilidad con las tecnologías anteriores. Para conseguirlo, se emplearon diversas técnicas:

- MIMO (Multiple Input Multiple Output): Envío y recepción mediante múltiples antenas, empleando varios canales de radio, por los que se transmiten diferentes paquetes de datos.
- CPC (Conectividad de Paquetes Continua): Cuando los canales de datos de los usuarios no tienen información para transmitir, se reduce la

interferencia en el enlace de subida, creada por los canales de control del sistema.

- Modulaciones más eficientes, como 64 QAM en sentido descendente y 16QAM en el ascendente.

Con estas y otras técnicas es posible obtener velocidades máximas teóricas de 42-84 Mbps, con latencias por debajo de 50 ms.

El 3GPP une actualmente a 7 organizaciones de desarrollo de estándares de telecomunicaciones (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), proporcionando a sus miembros un entorno estable en el que se generan las especificaciones que definen las tecnologías 3GPP.

Poco antes de 2010, las redes UMTS y HSPA llegaron al 85% de los abonados móviles. Es por eso que LTE 3GPP quiso garantizar la ventaja competitiva sobre otras tecnologías. De esta manera, se diseñó un sistema capaz de mejorar significativamente la experiencia del usuario con total movilidad, que utilice IP para transportar cualquier tipo de tráfico extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS) incluyendo el tráfico de voz, basándose en Voz sobre IP (VoIP), lo que permite una mejor integración con otros servicios multimedia.

La evolución de las tecnologías móviles, con referencia a su generación y sus principales características queda reflejada en la Fig. 2.1.

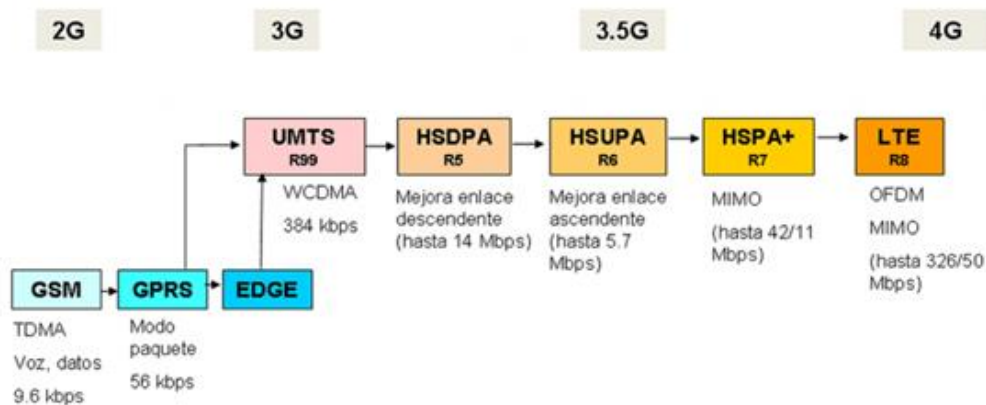


Fig.2.1 Esquema de la evolución de los sistemas móviles.

El primer servicio público de LTE se desplegó en Estocolmo y Oslo el 14 de diciembre de 2009. En España, Telefónica empezó a dar servicio de esta tecnología en Madrid y Barcelona en septiembre de 2011.

LTE es una tecnología estable y con grandes prestaciones, que presenta tres características clave: permite altas tasas de bits con baja latencia, es barato y fácil de desplegar por los operadores, y evita la fragmentación por el

tipo de duplexado. Emplea enlaces OFDMA para minimizar las interferencias e incrementar la eficiencia espectral (aumenta entre el 100 y el 400% con respecto a HSPA), soporta velocidades máximas descendentes de 326 Mbps y ascendentes de 86.4 Mbps con anchos de banda de 20 MHz.

La ITU creó un comité llamado IMT-Advanced, en el que se definen los requisitos necesarios para que un estándar sea considerado 4G. A partir de entonces se empezó a estudiar qué tecnologías eran las candidatas para ser denominadas 4G, concluyendo que LTE, no es 4G, porque no cumple los requisitos definidos por el IMT-Advanced respecto a velocidades pico de transmisión y eficiencia espectral. Aun así la ITU declaró en 2010 que los candidatos a 4G, como era éste, podían publicitarse como 4G.

La 4G está basada completamente en el protocolo IP, postulando un sistema basado en la convergencia entre las redes cableadas e inalámbricas. Esta tecnología puede ser usada por módems inalámbricos, terminales móviles avanzados y otros dispositivos. La principal diferencia con las generaciones predecesoras es la capacidad para proporcionar velocidades de acceso mayores de 100 Mbit/s en movimiento y 1 Gbit/s en reposo, manteniendo una calidad de servicio (QoS) de extremo a extremo de alta seguridad que permita ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento, en cualquier lugar, con el mínimo coste posible.

Esta convergencia surge de la necesidad de agrupar los diferentes estándares en uso, para delimitar el ámbito de funcionamiento de cada uno de ellos y con el fin también de integrar todas las posibilidades de comunicación en un único dispositivo, de forma transparente al usuario.

Se puede decir, por tanto, que la 4G no es una tecnología o estándar concreto, sino una colección de tecnologías y protocolos, diseñados para garantizar un máximo rendimiento.

Las únicas 2 tecnologías que estrictamente están calificadas como 4G son LTE Advanced y Wimax.

## **2.3 Características de LTE**

Después de conocer la evolución producida en las tecnologías de comunicaciones móviles, y apreciar su rápido cambio se pasará a detallar las características principales de LTE, y a explicar sus aspectos fundamentales, tales como la modulación que utiliza, la arquitectura del sistema y algunas técnicas fundamentales en su concepción, como el uso de MIMO, comparando las diferencias entre los enlaces ascendentes y descendentes, para que se vea que se trata de dos elementos diferentes y pueden ser tratados como tal.

### **2.3.1 Características base**

La norma LTE fue desarrollada por 3GPP como una la evolución de la red de acceso de UMTS, denominada UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). El desarrollo de la norma LTE comenzó en 2005 y dio lugar a las especificaciones para el Evolved Packet Core (EPC) y una nueva forma de acceso de radio denominada Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Todo esto está oficialmente incluido en el "3GPP Release 8", cuyas principales característica se indican en Tabla 2.1.

LTE tiene una serie de particularidades que permiten aprovechar las condiciones de un canal radio de una forma extremadamente eficiente. El resultado es un incremento importante de la capacidad del sistema, optimizando la energía necesaria. Como contrapartida, el análisis y la simulación de este tipo de sistemas se dificulta. Se hace necesario un enfoque diferente al utilizado en otros tipos de sistemas móviles para abordar la planificación de este tipo de redes.

Las principales características de LTE son:

- Utiliza OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) en el enlace descendente. Se trata de una técnica que permite el acceso múltiple dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras ortogonales que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios.
- Utiliza SC-FDMA (Single-Carrier OFDMA) en el enlace ascendente. El consumo de potencia es especialmente importante para el enlace ascendente por lo que se utiliza SC-FDMA, una alternativa más eficiente en términos de potencia y que conserva la mayoría de las ventajas de OFDMA.
- Amplia flexibilidad del espectro: Es una de las principales características de LTE. La existencia de distintos marcos regulatorios dependiendo de la zona geográfica de despliegue, así como la coexistencia con varios operadores, otros servicios y sistemas, hacen necesaria la flexibilidad en el ancho de banda usado dentro de la banda de despliegue; así, se puede emplear cualquier ancho de banda (de 180 kHz en 180 kHz). En LTE se definen unos anchos de banda nominales posibles de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz.
- LTE trabaja en un rango de bandas de frecuencias que van desde 800 MHz a 3.5 GHz.
- -LTE permite además un uso óptimo del espectro radioeléctrico, gracias al uso de técnicas de Asignación Dinámica del Espectro (Dynamic Spectrum Assignment, DSA). El sistema es capaz, en función de las condiciones del canal en cada bloque de frecuencia e instante de tiempo, de seleccionar los usuarios en mejores condiciones.

- La utilización de esquemas MIMOS, múltiples antenas. Los beneficios del uso de este tipo de técnicas son muy variados:
  - Protección adicional a los desvanecimientos del canal radio por medio de técnicas de diversidad espacial o diversidad de polarización.
  - Posibilidad de "modular" los diagramas de radiación resultantes en transmisión y recepción consiguiendo, por ejemplo, aumentar la ganancia en una dirección deseada, cancelar alguna interferencia, etc.
  - Obtención de elevadas tasas de datos mediante la utilización de múltiples canales en paralelo (multiplexación espacial).
- Control de potencia en el enlace ascendente. Se mejora así la capacidad del sistema y reducir el consumo de potencia.
- Coordinación de la interferencia intercelular: LTE permite la coordinación entre las distintas estaciones base con el objetivo de identificar las condiciones de los enlaces con los usuarios. La utilización de diferentes esquemas de reutilización de frecuencias permite reducir la interferencia intercelular.
- Arquitectura de red simplificada, con el mínimo número de interfaces y entidades funcionales; estas están basadas en paquetes, pero soportan servicios en tiempo real.

Tabla 2.1 Requerimientos del Rel-8 de LTE.

<b>Velocidad máxima</b>	En bajada 100 Mbps a 20MHz En subida 50 Mbps a 20MHz
<b>Eficiencia espectral de celda</b>	En bajada 3-4 veces la de HSDPA En subida 2-3 veces la de HSUPA
<b>Eficiencia espectral de usuario</b>	En bajada 3-4 veces la de HSDPA En subida 2-3 veces la de HSUPA
<b>Movilidad</b>	Hasta 350 km/h
<b>Rango máximo de celda</b>	100 km
<b>Soporte del espectro</b>	Flexible hasta 20 MHz
<b>Latencia del plano de usuarios</b>	5 ms
<b>Capacidad del plano de control</b>	400 usuarios

- 3 tipos de canales:
  - Canales lógicos: definen el tipo de información enviada (de control o tráfico).



- Canales de transporte: definen el formato de envío (común o compartido).
- Canales físicos: formados por conjuntos de recursos tiempo-frecuencia (comunes o dedicados).

### 2.3.2 Modulación OFDM, OFDMA y SC-FDMA

LTE utiliza una modulación denominada OFDM (multiplexación ortogonal por división en frecuencia) adaptada para proporcionar un esquema de acceso múltiple utilizando OFDMA en enlaces descendentes y SC-FDMA en los ascendentes. Esta modulación presenta muchas ventajas, tales como su robustez ante los desvanecimientos y la interferencia.

OFDM utiliza un gran número de portadoras que están muy cerca unas de las otras, moduladas individualmente con datos a baja velocidad.

Normalmente estas señales interferirían entre ellas, pero al hacerlas ortogonales entre sí este hecho no se produce, por lo que los datos que se transmiten se dividirían entre todas las portadoras, para ofrecer mayor robustez ante las interferencias y los desvanecimientos que producen el multicamino.

La implementación concreta de la tecnología difiere entre el enlace descendente y el ascendente, para adaptarse a los diferentes requerimientos que presentan. Además, OFDM puede usarse en los formatos FDD y TDD (duplexados por división en frecuencia/tiempo).

Uno de los parámetros clave en el uso de OFDM es la elección del ancho de banda, ya que influirá en el número de portadoras que puede tener la señal y en la longitud de símbolo. Así, mayor ancho de banda mayor capacidad del canal. En LTE van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz.

La separación entre las subportadoras es de 15 kHz, y pueden soportar una velocidad máxima de datos de 15000 símbolos por segundo, correspondiéndose, por ejemplo, con una tasa de datos de 108 Mbps usando 64QAM en un sistema de 20 MHz. Las diferencias con los valores que aparecen en el estándar LTE, se deben a la sobrecarga de control y la codificación, además del uso de técnicas como la multiplexación espacial.

Dentro de la señal OFDM es posible elegir entre 3 tipos de modulación para la señal LTE: QPSK, 16QAM o 64QAM, lo que se hace dependiendo de las condiciones del medio: las modulaciones menos eficientes no requieren una SNR elevada, pero transmiten los datos más lentamente, solo cuando hay una SNR lo suficientemente alta se puede utilizar una modulación con más bits por símbolo, lo que implica mayor velocidad.

En el enlace descendente las subportadoras se dividen en bloques de recursos (Resource Blocks), esto permite que el sistema sea capaz de

transportar los datos en “compartimentos” a través de números fijos de subportadoras. Estos bloques agrupan 12 subportadoras, sin tener en cuenta el ancho de banda de la señal LTE; también cubren una ranura en el marco temporal, lo que implica que diferentes anchos de banda LTE tendrán diferentes números de RB, como se indica en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Comparación número de RB dependiendo del ancho de banda.

Ancho de banda del canal (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Numero de RB	6	15	25	50	75	100

Hay un máximo de 2048 subportadoras, y los móviles tienen que ser capaces de recibir las 2048; sin embargo las estaciones base solo necesitan ser capaces de soportar la transmisión de 72, por lo que cualquier móvil podrá comunicarse con cualquier estación base.

Para el enlace ascendente en LTE se utiliza un concepto diferente en la técnica de acceso, una variante de la tecnología OFDMA usada en el descendente, denominada SC-FDMA (Single Carrier Frequency División Multiple Access). La diferencia entre ambos enlaces se indica en Fig. 2.2.

Esto se debe a que uno de los parámetros clave en el uso de los terminales móviles es la duración de la batería y, a pesar de que este rendimiento está mejorando mucho, aún es necesario garantizar que consuman la mínima energía posible. Siendo el amplificador de potencia de radiofrecuencia (el encargado de transmitir la señal a través de la antena a la estación) el elemento con mayor consumo en el sistema, se usa esta alternativa que proporciona una mayor eficiencia.

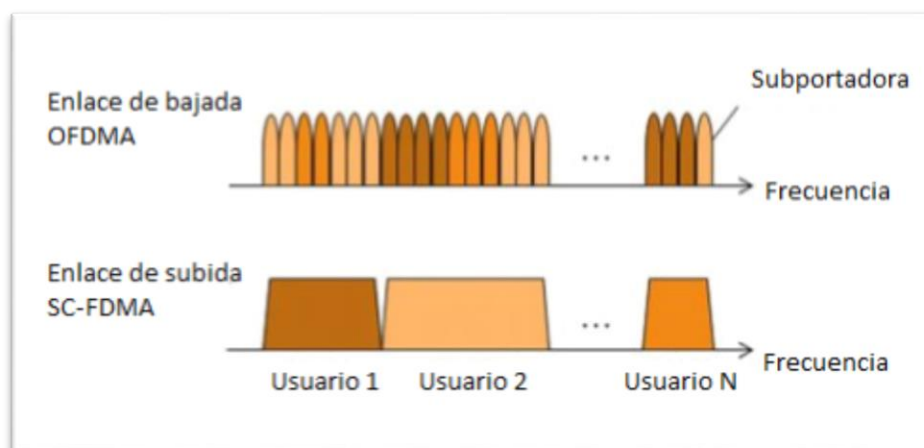


Fig. 2.2 Diferenciación enlaces ascendentes y descendentes

Este elemento puede verse afectado de manera significativa por la forma de la modulación empleada y el formato de la señal; así, las señales con altos

picos que requieren amplificación lineal no son eficientes con estos amplificadores, por lo que hay que emplear un modo de transmisión que tenga un nivel de potencia más o menos constante. En el enlace descendente esto no importa pues la potencia no es un problema. Por tanto se utiliza un formato híbrido, combinando potencias constantes ofrecidas por los sistemas de única portadora, con la capacidad de resistencia a la interferencia del multicamino y la asignación flexible de frecuencias que ofrece OFDM.

### 2.3.3 Arquitectura del sistema LTE

Las arquitecturas de red que surgen de las especificaciones del 3GPP se adaptan a la arquitectura genérica de los sistemas celulares, abarcando la especificación del equipo de usuario y una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal (Core Network, CN) y una de red de acceso (Access Network, AN).

La parte de usuario está compuesta por dos elementos: el dispositivo o terminal móvil y una tarjeta denominada SIM, la cual es la encargada de almacenar información y facilitar procedimientos como la utilización del usuario a los servicios de la red.

En cuanto a la red de acceso, para LTE se emplea una nueva con respecto a GSM y UMTS (GERAN y UTRAN), llamada E-UTRAN, la cual utiliza la tecnología OFDMA explicada en el apartado anterior. Respecto a la red troncal, EPC es la nueva especificación desarrollada en el del sistema LTE. EPC es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. También 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.

Estos componentes se diseñaron para soportar cualquier tipo de servicio de telecomunicaciones mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes como Internet; por tanto, la red física utilizada para conectar los diferentes equipos de una red LTE es una red IP convencional, utilizando, además de los equipos que implementan las funciones del estándar 3GPP, otros elementos de red característicos de las redes IP, como routers, servidores DHCP para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP.

La arquitectura de la red de acceso 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 EPC.

La conexión entre el eNB y el usuario se realiza mediante la interfaz radio LTE (Uu) que permite la transferencia de información por el canal radio entre el equipo y la estación, todas las funciones y protocolos necesarios para ello están implementados en el eNB. La conexión del eNB a la red troncal EPC se realiza mediante la interfaz S1, la cual se desdobra en 2, correspondiéndose con los planos de usuario y de control, encargados de los protocolos necesarios para el envío de tráfico, o la gestión de las funciones necesarias para una correcta gestión y señalización, respectivamente. Este esquema se muestra en la Fig. 2.3. Esta separación de los 2 planos es una característica importante en las redes LTE, pues permite asignar de manera independiente los recursos necesarios para el soporte de la señalización y para el envío de tráfico de los usuarios.

La funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos radio, posee funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (como la decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente, control de interferencias entre estaciones base, o el control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario. Por último, un eNB puede gestionar una o varias celdas y utilizar o no sectorización, en el marco de este trabajo no se va a contemplar su uso.

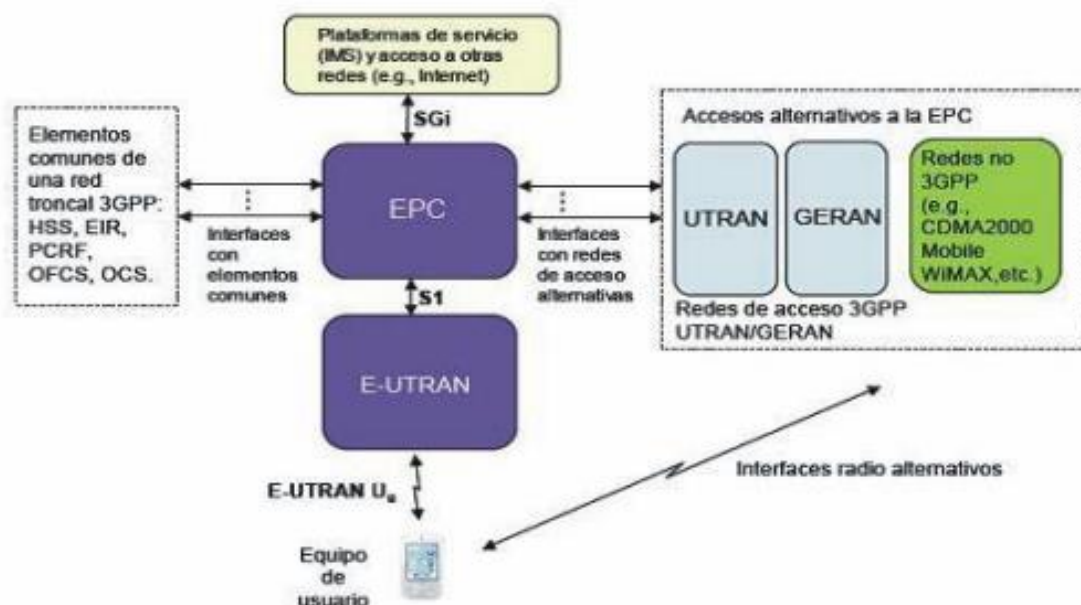


Fig. 2.3 Esquema de la arquitectura LTE

### 2.3.4 Técnicas MIMO

Las siglas MIMO significan Multiple Input Multiple Output, (múltiples entradas múltiples salidas), y esta técnica supone una de las mayores innovaciones tecnológicas de LTE, ya que proporciona una ganancia significativa en la capacidad del sistema. Permite a LTE la oportunidad de mejorar aún más el rendimiento, incrementando la eficiencia espectral por encima de lo obtenido con el uso de OFDM. Aunque también añade complejidad al sistema en términos de procesamiento y requiere el uso de varias antenas, se implementa como una parte fundamental de LTE, por las mejoras que añade al sistema.

El funcionamiento básico de MIMO se basa en aprovechar los efectos de la propagación multicamino que están presentes en todas las comunicaciones inalámbricas como una ventaja para el sistema. El transmisor y el receptor tienen más de una antena, y son capaces de utilizar los diferentes caminos que hay entre los 2 extremos para mejorar la velocidad de transmisión de datos.

Las dos principales limitaciones en los canales de comunicación suelen ser la interferencia multicamino y las velocidades máximas de transmisión de datos. MIMO proporciona una manera de utilizar las múltiples trayectorias que existen entre el transmisor y el receptor para mejorar significativamente el rendimiento sobre un canal dado y con un ancho de banda definido. Mediante el uso de múltiples antenas en ambos terminales junto a un complejo procesamiento digital de la señal, esta tecnología permite al sistema configurar diferentes flujos de datos en el mismo canal, aumentando así la capacidad de dicho canal.

En LTE el uso de esta tecnología se ha ido introduciendo en las diferentes versiones de los estándares. En las versiones 8 y 9 no se proponía el uso de múltiples antenas de transmisión en el usuario ya que, debido al interés de reducir la potencia emitida por el terminal, incorporaba solo un amplificador de potencia. Fue en la versión 10 cuando aparecieron nuevos esquemas, incorporando la multiplexación espacial de lazo cerrado y las múltiples antenas en el usuario.

Hay diferentes maneras de implementar MIMO en un sistema LTE, dependiendo del equipamiento que se utilice, las funciones del canal y las características del enlace.

- Antena simple: esta es la forma más sencilla de transmisión en redes inalámbricas, un solo flujo de datos se transmite desde una antena y se recibe por una o varias. Se denomina SISO o SIMO (single in single/multiple out), en función del número de antenas usadas en la recepción.
- Diversidad en transmisión: Este esquema de LTE MIMO transmite el mismo flujo de información por múltiples antenas, pudiendo ser 2 o 4 ya que ambas configuraciones están soportadas por el estándar. La información que se transmite se codifica de manera diferente, y con ello

se consigue una mejora de la calidad de la señal en recepción, pero no un aumento de la velocidad de los datos.

- Multiplexación espacial de lazo abierto: Esta forma de utilizar MIMO implica el envío de dos flujos de información desde 2 o más antenas, y no está disponible en el usuario.
- Multiplexación espacial de lazo cerrado: Es similar a la anterior pero ha incorporado retroalimentación, permitiendo que el transmisor compruebe la validez del código de los datos para optimizar la transmisión, con lo que el receptor puede separar más fácilmente los diferentes flujos de datos.
- Multi-usuario MIMO (MU-MIMO): Permite que el sistema envíe diferentes flujos espaciales hacia diferentes usuarios.
- Beam-forming (formación de haz): Es el modo más complejo de MIMO; permite utilizar vectores lineales para que la antena se focalice en un área concreta, reduciendo la interferencia y aumentando la calidad de la transmisión. El terminal estima la calidad del canal a partir de las señales de referencia que emiten las antenas.

## **2.4 Desacoplamiento del enlace ascendente y descendente**

### **2.4.1 Introducción a DUDe**

Tradicionalmente, de la primera a la cuarta generación de redes móviles, los enlaces descendente y ascendente de una misma sesión han estado acoplados.

El terminal móvil del usuario siempre ha tenido que asociarse a la misma estación base tanto para recibir datos como para enviarlos, sin que fuera posible cambiarlo. Normalmente siempre se ha pensado que esto era lo óptimo, pues se creía que si la conexión era mejor y más robusta lo sería en ambos sentidos. Sin embargo esta aproximación se ha puesto en duda debido a las posibles ganancias que se pueden obtener en redes heterogéneas (en las que coexisten macro y micro células) en las que las diferentes estaciones base tienen distintas potencias de transmisión y capacidades de carga, además de otras características.

Los argumentos que favorecen que la asociación de subida-bajada sea a la misma estación base son muy amplios, desde una perspectiva de diseño de la red, los 3 canales: lógicos, de transporte y físicos son mucho más fáciles de diseñar y operar, fundamentalmente en temas como la sincronización de los ACK/NACK, los procedimientos de admisión de llamada y de traspaso, el mantenimiento de los recursos radio de enlace ascendente y descendente y el control de potencia. Además, desasociar los dos enlaces también requeriría una fuerte sincronización y conectividad de datos entre las estaciones base (mediante fibra óptica o similar).

Desde otra perspectiva, en este caso teniendo en cuenta el despliegue y la topología, hasta hace unos pocos años los sistemas celulares se diseñaban asumiendo que las redes eran homogéneas, con macro células que trabajaban a la misma potencia, no dando pie a esta disociación de los enlaces, pues no saldría rentable.

Por último, habría que tener en cuenta un tercer punto de vista: el del tráfico de datos, puesto que inicialmente, con la segunda generación, la carga estaba más o menos balanceada entre la bajada y la subida, pues las comunicaciones estaban centradas en la voz, con lo que el tráfico era simétrico, pero con la aparición de los sistemas 3.5G y 4G, la carga de los enlaces descendentes se ha convertido en la dominante, justificando así el uso de una asociación centrada en la descarga y no en la subida.

#### 2.4.2 Razonamiento de la utilización de DUDe

Pese a todos estos argumentos en contra del desacoplamiento, se sigue pensando que si se realiza un buen diseño de una asociación basada en el DUDe (Downlink/Uplink Decoupling) o lo que es lo mismo, la separación de los enlaces de subida y bajada de la misma estación base a dos diferentes, se podría mejorar el rendimiento de las soluciones tradicionales.

Para fundamentar esta creencia se presentarán 5 argumentos a favor que ponen de manifiesto que, efectivamente, los resultados al usar esta técnica están por encima de los de una solución tradicional; en el Capítulo 4 se mostrarán resultados experimentales para ilustrar los argumentos aquí descritos.

- Aumento de la SINR en el enlace de subida, y reducción de la potencia de transmisión

En una red heterogénea, el área de cobertura en el enlace descendente, proporcionado por una macro célula, es mucho mayor que las que ofrecen las micro células, que cuentan con estaciones base que emiten a menos potencia. Esta diferencia de cobertura de área se debe no solamente a la potencia mencionada, sino que es consecuencia de otros parámetros como la altura de las estaciones base y las ganancias de sus antenas.

Sin embargo, cuando se habla del enlace ascendente la situación cambia, pues la potencia de transmisión máxima de los terminales móviles es similar, por lo que un terminal que esté asociado con una macro célula para descargar podría preferir asociarse a una de las micro células que tenga más cerca para transmitir por el enlace ascendente, ya que al reducir la distancia con la estación base se verían reducidas las pérdidas de propagación, lo cual implicaría directamente un aumento de la SINR que tendría ese usuario.

Además, para un objetivo fijo de SINR, la reducción de estas pérdidas de propagación también permitiría disminuir la potencia a la que tendría que

transmitir el terminal gracias al uso de técnicas de control de potencia, con el ahorro de batería y recursos que ello conllevaría.

- Mejora de las condiciones de interferencia en los enlaces ascendentes

El uso de DUDe también reduce las interferencias que aparecen en los enlaces ascendentes, debido a varios efectos complementarios:

Para empezar, como se ha comentado previamente, la potencia de transmisión se reduciría, disminuyendo por tanto la interferencia que generarían los demás usuarios del área al emitir por su enlace ascendente hasta 2-3 dB, siendo especialmente significativo sobre todo para los usuarios que tuvieran una SINR baja en la conexión ascendente. Para tales casos, y teniendo en cuenta una red densa, reducir la interferencia 3 dB permitiría duplicar la velocidad de transmisión de datos.

Además, el uso de esta técnica de desacoplamiento ofrece la posibilidad de elegir independientemente la asociación que minimiza la interferencia entre el usuario y la estación base. Así, el cálculo para los enlaces ascendentes y descendentes es diferente: En la parte ascendente influyen el número de transmisiones usuario-estación en las celdas, la localización de dichos usuarios, su distancia con la estación base y el control de potencia que realicen. En el descendente depende de la potencia de transmisión de las estaciones base y las distancias entre las diferentes BS, principalmente.

Por todo esto, los niveles de interferencia pueden variar en los recursos ascendentes y descendentes, permitiendo mejorar notablemente los resultados del tradicional, debido a la posibilidad de elegir el mejor escenario para obtener la menor interferencia en ambos sentidos de manera independiente.

Por último, DUDe facilitaría que comunicaciones Device to Device, en enlaces ascendentes, estén en una situación más beneficiosa, debido a la reducción de potencia de transmisión y la interferencia.

- Mejora de velocidad de transmisión de datos en enlaces ascendentes

A partir de los anteriores argumentos se puede deducir que al aumentar la potencia recibida y reducir la interferencia se conseguiría una SINR más elevada, y con ello una mayor eficiencia espectral, (todas las fórmulas necesarias para estos cálculos se expondrán en el siguiente capítulo), obteniendo así una mayor velocidad de transmisión de datos.

Estas ganancias aparecen principalmente por la mejora de la calidad del canal, lo que permite a los usuarios acceder a un mayor número de recursos, lo que resulta en una tasa superior. Hay estudios de polarización y teoría de la optimización que prueban que la ganancia de velocidad es del orden del 100-200%, poniendo de manifiesto aún más la capacidad de esta técnica.

- Diferente balance de carga en el enlace ascendente y en el descendente



La carga que una estación base tiene en el enlace ascendente puede ser diferente de la correspondiente al descendente, esto implica que no es óptimo tener el mismo número de usuarios conectados a la misma estación base en subida y en bajada, por lo que alguno de ellos debería utilizar técnicas de desacoplamiento para repartir la carga, adaptándola a los recursos que dispone la estación base en ambos sentidos de la comunicación.

Por esto, este método permite que los usuarios hagan un mayor uso de micro células que eran poco utilizadas para la descarga, debido a cuestiones de interferencia, y a que era mejor que las macro células les proporcionaran los recursos necesarios en el enlace ascendente.

- Bajos costes de implementación con centralización en redes de acceso radio

Implementar una asociación de células desacopladas en una red real requiere una excelente conectividad entre las diferentes estaciones base, además de un esquema de cooperación mutua; así, el principal requerimiento que impone DUDe es la baja latencia en la conexión entre las estaciones base de subida y bajada, para permitir un intercambio rápido de los mensajes de control, tal como se aprecia en la Fig. 2.4. Sin embargo, no se impone un requisito estricto en dicha capacidad de retorno, a diferencia de las técnicas CoMP en las que sí es necesario. Además, permite que haya ganancias muy similares en los enlaces, como ofrecía MIMO, aunque con unos costes de implementación más reducidos en DUDe.

La tendencia actual que lleva al uso de redes de acceso radio centralizadas (C-RAN), en las cuales hay disponible una conexión de retorno de alta velocidad, facilita mucho el posible desacoplamiento de los enlaces de subida y bajada, ya que la señalización podrá ser enviada a la central de procesado con una latencia muy baja, en cuyo caso el coste que llevaría implementar DUDe sería muy reducido.

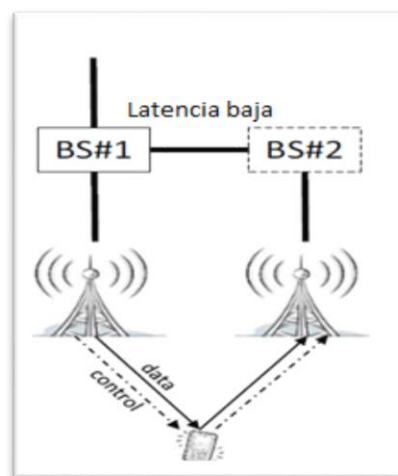


Fig. 2.4 Esquema de transmisión DUDe habitual

Cabría decir que dependiendo del despliegue de estaciones en el escenario y de las propiedades de retorno de la red, DUDe podría soportarse en la actualidad por las especificaciones ya existentes de LTE y LTE-A.

En el siguiente capítulo se explicarán los pasos llevados a cabo con su correspondiente formulación para calcular los correspondientes parámetros, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, y se observará que se obtienen de manera diferente.

## **CAPITULO 3. HERRAMIENTA**

### **3.1 Introducción a la herramienta**

Tras haber explicado los conceptos teóricos necesarios sobre LTE, su aparición, características más importantes y haber argumentado a favor del uso de las técnicas DUDe, se procederá a explicar el entorno de trabajo que se ha utilizado durante la realización del proyecto.

Para ello se describirá la herramienta con la que se han realizado los análisis, indicando cómo funciona, sus partes principales y las modificaciones que se han realizado para llegar a resultados concretos que ilustren las ventajas del uso de DUDe, detallando las diferentes clases que se han añadido, su utilidad y la formulación utilizada.

El lenguaje de programación utilizado ha sido C++, sobre el cual se han implementado las diferentes partes de la herramienta, las clases y las modificaciones realizadas.

Esta herramienta, cuya base forma parte de una línea de investigación abierta del Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria, sirve para desplegar escenarios, simularlos y analizarlos para obtener datos concretos, que posteriormente se podrán procesar, obteniendo gráficas y estadísticas.

Estos escenarios serán redes LTE que se desplegarán acorde a ciertos parámetros, y se utilizarán para comparar los resultados al utilizar técnicas DUDe frente a una operación tradicional.

### **3.2 Composición de la herramienta**

La herramienta está compuesta por varias partes diferenciadas, algunas de ellas son bastante complejas, y no se van a tratar pues se sale del alcance de este trabajo.

Los elementos que más interesan y que más se van a utilizar a la hora de elaborar los escenarios y los cálculos para las simulaciones son los siguientes:

- Archivo de configuración
- Trazas
- Escenarios
- Tipos
- Parámetros
- Módulos

Antes de proceder a explicar y detallar cada una de ellos, cabe decir que la herramienta no solo simula de manera puntual un escenario concreto, sino que va tomando “fotografías” del mismo, realizando iteraciones temporales del mismo, por lo que su operación es relativamente compleja.

### 3.2.1 Archivo de configuración

Este archivo se utilizará para leer cierta información que será fija, independiente de cálculos o del despliegue realizado. En él está toda la información básica referida a los usuarios, servicios y estaciones base; a su vez indicará el tamaño del área del escenario y su tipo (urbano, en este caso), el tiempo total y la frecuencia de las iteraciones (snapshot), pudiendo así obtener el número de instancias que se analizarán.

Dentro de los usuarios se puede encontrar, entre otras cosas, el número total, los tipos que se considerarán, y las características de los mismos. En este proyecto, como se analizan los enlaces ascendentes, será necesario añadir varios parámetros como la potencia base y potencia máxima a la que transmiten los terminales, así como un parámetro para compensar las pérdidas de propagación (todo esto se explicará cuando se detallen las clases en las que se calculan los parámetros de LTE).

Para las estaciones base se indicarán si son de tipo macro o micro, su capacidad, potencia a la que transmiten, frecuencia, ganancias, etc. En este trabajo se evita el uso de sectorización.

Respecto a los servicios, se indica el número de servicios diferentes, así como la capacidad que requiere cada uno.

Este archivo servirá para configurar los tipos de los que se hablará posteriormente.

### 3.2.2 Trazas

Las trazas son unos archivos que contienen información de los usuarios y de las estaciones base. Se consideran 2 tipos, las que sirven para indicar la posición de todas las estaciones en el despliegue, así como su identificador y el tipo (macro o micro); y las de usuario, que contienen la posición del usuario, su identificador, el tipo correspondiente (en el archivo de configuración se pueden definir diferentes tipos de usuarios), y si está activo, es decir, si está utilizando algún servicio y necesitaría conectarse o si, en caso contrario, no necesita disponer de conectividad.

Las trazas de las estaciones permanezcan constantes durante la simulación, variando únicamente el número de las mismas en función del escenario requerido, mientras que las de usuario irán cambiando en cada iteración, permitiendo así “mover” a los usuarios por el escenario.

Por último, cabe destacar que una vez se han desplegado todos los elementos, el archivo de configuración no se utilizará más, ya que se irá calculando a partir de lo obtenido en la iteración anterior, utilizando las trazas.

### 3.2.3 Escenarios

En el apartado de escenarios se indican todas las clases (módulos) que participan en la simulación, detallando orden de ejecución en la misma.

Por último, esta clase también es la responsable de crear la red, para lo que llama a todas las funciones que sirven para leer las trazas y combinar toda la información en el escenario final.

### 3.2.4 Tipos

Las clases denominadas tipos contienen información de los diferentes usuarios, elementos de acceso y servicios; esta información se obtiene principalmente del archivo de configuración y es fija durante toda la simulación, pudiéndose acceder a ella desde cualquier clase. Esta información es diferente, dependiendo del usuario, elemento de acceso o servicio con el que se esté trabajando.

La característica principal de los tipos es que no varían con las iteraciones; así, un mismo usuario, elemento de acceso o servicio tendrá siempre la misma información. Por ejemplo, un usuario para el que se ha fijado una potencia de transmisión, no la modificara aunque sea movido en diferentes iteraciones.

### 3.2.5 Parámetros

Estas clases contienen información dinámica acerca de los usuarios, elementos de acceso calculada en los diferentes módulos favoreciendo que los diferentes métodos accedan a ella. Por ejemplo, tras calcular la SINR de un usuario en un módulo, esta información se pasa a los parámetros de ese usuario, de manera que otro modulo que la necesite pueda consultarla.

Además, los parámetros varían dependiendo de la iteración, ya que para un mismo usuario o servicio estos parámetros pueden cambiar dependiendo de la iteración en la que estén.

### 3.2.6 Funcionamiento conjunto

Antes de proceder a explicar los módulos creados, se va a hacer una explicación conjunta de cómo funciona esta herramienta, uniendo todo los conceptos explicados en los apartados anteriores.

Primeramente se leería el archivo de configuración para determinar las características básicas del modelo; tipos de los usuarios, elementos de acceso y servicios; posteriormente, a partir de las trazas se lleva a cabo el despliegue, situando cada estación y usuario en su lugar y estableciendo sus características e indicando los servicios activos en cada usuario.

Cabe decir que los usuarios y elementos de acceso están guardados en un contenedor que sirve para facilitar el acceso a los mismos a la hora de realizar cálculos, pues con un simple ciclo se podrá actualizar la información de cada usuario/elemento de acceso, siendo mucho más fácil acceder a estos datos posteriormente.

Estos resultados podrían mostrarse por consola utilizando las opciones de debug incluidas en la herramienta, aunque no es óptimo, pues una vez el despliegue crece en tamaño hay muchos resultados y comentarios diferentes, por lo que es necesario volcar los resultados en un fichero, que puede utilizarse posteriormente para analizarlos.

A partir de la segunda iteración no se volverá a plantear todo el escenario, sino que se partirá del creado en la primera, realizando los cambios indicados en las trazas y llevando a cabo el cálculo de todos los módulos nuevamente, esto se hará el número de veces que se deduzcan de los dos parámetros del archivo de configuración de duración total y tiempo de snapshot. Una vez procesadas todas las fotografías se obtienen los resultados finales, con los cuales ya se extraerán las conclusiones pertinentes. Este funcionamiento se resume en la Fig. 3.1.

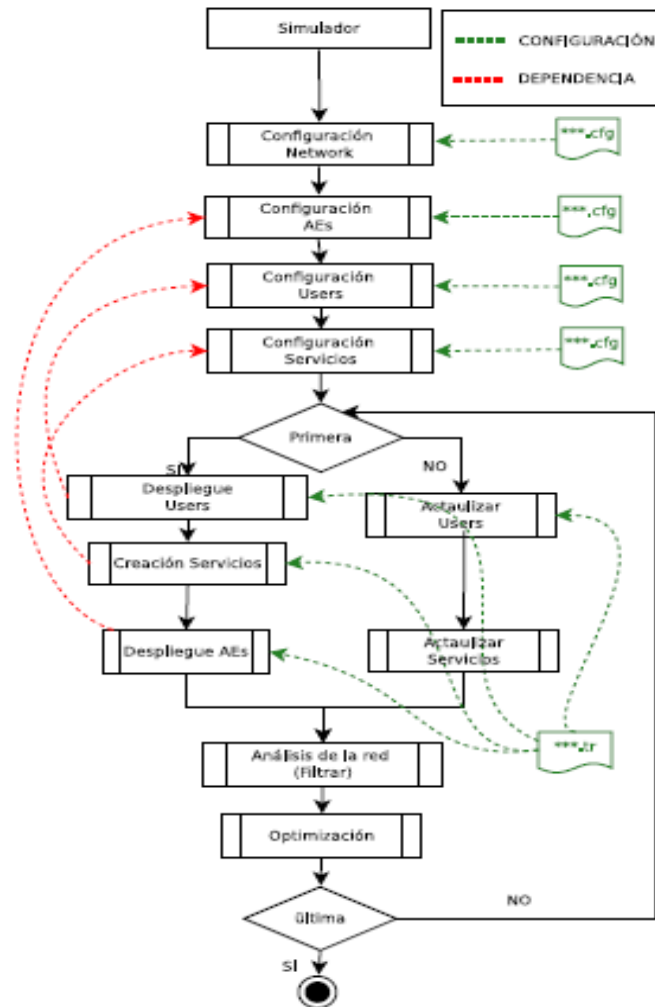


Fig. 3.1 Funcionamiento de la herramienta

### 3.3 Módulos

Por último se describen todos los módulos que se han creado y añadido a la herramienta para mostrar la diferencia de los enlaces ascendentes y descendentes, y demostrar que la utilización de las técnicas DUDe en estos escenarios favorece un ahorro de potencia por parte de los usuarios, aumenta su SINR y mejora las cargas de las estaciones.

Se pueden diferenciar 2 tipos de clases diferentes: las que obtienen las características de los enlaces descendentes y las correspondientes a los ascendentes, además hay clases comunes que sirven para registrar resultados, o las pérdidas de propagación que son iguales para ambos sentidos.

En todos ellos lo primero que se comprobaba será la intención del usuario, comprobando si se quiere cursar algún servicio en cada una de las iteraciones, en caso negativo no se le considerará en ningún cálculo. A continuación, se tendrá en cuenta si el terminal está dentro del área de cobertura de alguna

estación base, para ello se observara si la SINR es menor de -10 dBW, descartando estos casos, indicando que no es posible establecer la conexión.

### 3.3.1 Enlaces descendentes:

- **Perdidas por propagación**

Para comenzar, se explicará la clase encargada de calcular las pérdidas de propagación, para ello se han introducido un conjunto de ecuaciones que se muestran en la Tabla 3.1, que dependen de la frecuencia, la altura de las antenas y de las distancias de los enlaces; además, se tendrá en cuenta si la célula es macro o micro y si existe línea de vista o no. Todo ello se leerá del archivo de configuración y de las trazas, excepto las alturas de las estaciones base, que se determinan en función de si son macro o micro.

Este modelo es aplicable en un rango de frecuencias de 2 a 6 GHz, y en ocasiones es complejo, debido a que en áreas urbanas hay multitud de obstáculos y diferentes alturas, aparecen desvanecimientos, etc.

Una vez calculadas estas pérdidas se guardarán en los parámetros del usuario, para poder ser utilizadas más adelante, tanto para el enlace descendente como para el ascendente.

Tabla 3.1. Modelos del pathloss en áreas urbanas

Escenario		PL [dB] fc (frecuencia) en GHz y distancia en m	Desvaneci mientos por sombras [dB]	Rango de aplicación y altura de antena(hBS) y usuario(hUT)
Micro Urbana	LOS	$PL = 22.0\log_{10}(d) + 28.0 + 20\log_{10}(fc)$	$\sigma=3$	$10\text{ m} < d1 < d'BP$ $hBS = 10\text{ m}$ , $hUT = 1.5\text{ m}$
		$PL = 40\log_{10}(d1) + 7.8 - 18\log_{10}(h'BS) - 18\log_{10}(h'UT) + 2\log_{10}(fc)$	$\sigma=3$	$d'BP < d1 < 5000\text{ m}$ $hBS = 10\text{ m}$ , $hUT = 1.5\text{ m}$
	NLOS	$PL = 36.7\log_{10}(d) + 22.7 + 26\log_{10}(fc)$	$\sigma=3$	$10\text{ m} < d < 2\ 000\text{ m}$ $hBS = 10\text{ m}$ $hUT = 1-2.5\text{ m}$
Macro Urbana	LOS	$PL = 22.0\log_{10}(d) + 28.0 + 20\log_{10}(fc)$	$\sigma=4$	$10\text{ m} < d < d'BP$ $hBS = 25\text{ m}$ , $hUT = 1.5\text{ m}$
		$PL = 40\log_{10}(d1) + 7.8 - 18\log_{10}(h'BS) - 18\log_{10}(h'UT) + 2\log_{10}(fc)$	$\sigma=4$	$d'BP < d < 5\ 000\text{ m}$ $hBS = 25\text{ m}$ , $hUT = 1.5\text{ m}$



	NLOS	$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/hBS)^2) \log_{10}(hBS) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(hBS)) (\log_{10}(d)-3) + 20 \log_{10}(fc) - (3.2 (\log_{10}(11.75 hUT)) 2 - 4.97)$	$\sigma=4$	$10 \text{ m} < d < 5\,000 \text{ m}$ $hBS = 25 \text{ m}, hUT = 1.5 \text{ m}, W = 20 \text{ m}, h = 20 \text{ m}$ Rangos aplicables: h= altura edificios, W= anchura de calle $5 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$ $5 \text{ m} < W < 50 \text{ m}$ $10 \text{ m} < hBS < 150 \text{ m}$ $1 \text{ m} < hUT < 10 \text{ m}$
--	------	--	------------	---

Se obtendría un PL diferente para cada estación base en cada usuario; es decir, en un mismo usuario, si tenemos 10 estaciones base, habrá 10 PL diferentes, los cuales cambiarán al iterar, pues dependen de factores como la distancia, que variará con la iteración.

- **Potencia recibida**

Esta clase servirá para calcular la potencia que le llega al usuario desde las diferentes estaciones base que hay en el despliegue.

Para ello utiliza la clase anterior, ya que necesita el PL que hay entre cada usuario y la estación base correspondiente. La fórmula utilizada para obtener esta potencia será la siguiente:

$$P_{Rx}(W) = P_{Tx} - \max(PL + \text{CouplingLoss} + \text{AntenaAtt} - G_{Tx} - G_{Rx}, \quad MCL)$$

Donde:

$P_{Rx}$ : Es la potencia de transmisión de la estación base, a partir del archivo de configuración y del tipo de BS.

$PL$ : Es el pathloss calculado en la clase anterior.

$G_{Tx}$  y  $G_{Rx}$ : Son las ganancias de transmisión y recepción de la estación base, que se obtendrán del tipo de la estación base, (valores del archivo de configuración).

$\text{CouplingLoss}$  y  $\text{AntenaAtt}$ : Son las pérdidas de acoplamiento del cable y la atenuación de la antena, valores también fijados en la configuración inicial.

$MCL$ : Es un valor dado por el 3GPP, que dependerá del tipo de BS, macro o micro.

Tabla 3.2. Valores típicos del MCL

	<b>Macro</b>	<b>Micro</b>
MCL (3GPP Solution for IMT-Advanced)	>70dB (URBAN)	> 53dB

Una vez calculada esta potencia, será guardada en los parámetros de usuario para ser utilizada posteriormente, utilizando un mapa en el que se indicarán las estaciones base y las potencias recibidas por ellas.

- **Potencia máxima**

En este módulo se utilizará el mapa de potencias creado anteriormente para determinar la estación de la que mejor potencia recibe el usuario. Esta estación será la seleccionada para que el usuario se conecte a ella, por lo que será con la que se harán los cálculos más adelante.

- **SINR**

Una vez sabida la estación con la que se conecta el usuario, se procede a calcular la relación señal/ruido-interferencia que percibe el usuario, teniendo en cuenta la interferencia que causan las estaciones y los usuarios que hay a su alrededor.

La expresión será la siguiente:

$$SINR (dBW) = \frac{P_{Rx}}{K * T * BW + I}$$

En la cual:

$P_{Rx}$ : Será la recibida por el usuario de la BS con la que se conecta.

$K$ : Es la constante de Boltzmann ( $K = 1.38 * 10^{-23}$  Julios/Kelvin).

$T$ : Es la temperatura ambiente ( $T = 300^\circ \text{ Kelvin}$ ). El producto de  $K$  y  $T$  se corresponde con la potencia de ruido blanco gaussiano ( $N_0 = K * T$ ).

$BW$ : Es el ancho de banda por resource block, 180kHz.

$I$ : Es la interferencia causada por otras BS y usuarios, que inicialmente será aleatoria, con valores estándares entre 3 y 6 dBW.

Una vez calculada la SINR, se almacenará en los parámetros de usuario, y se procederá a comprobar la cantidad de servicios que se están cursando, diferenciando entre 2 tipos, obteniendo el número de servicios perdidos/caídos y el reparto que se realiza entre las macro y micro estaciones en el enlace descendente.

- **Eficiencia espectral**

Tras obtener la SINR, se puede calcular la eficiencia espectral, para lo que se utilizará la siguiente expresión, que es la relación de Shannon corregida.

Para proceder a su cálculo se utilizara la siguiente expresión:

$$Eficiencia (bits/s/Hz) = BW_{eff} * \eta * \log_2 (1 + SINR/SINR_{eff})$$

Los parámetros que intervienen son los siguientes:

*SINR*: Es la calculada anteriormente.

*SINReff*: Es un valor de referencia, que se fija en 1.25 ya que su cálculo es complejo.

*BW<sub>eff</sub>* = 0.85, de ancho de banda relativo eficiente, a partir de la eficiencia de la capa de enlace (85%).

$\eta = 0.9$ , es un valor de corrección.

Se va a considerar que la eficiencia espectral máxima sea 5, pues en la realidad no se suele superar. Tras realizar este cálculo se guardará en los parámetros de usuario, pudiendo utilizarla en los siguientes pasos.

- **Resource Blocks**

En esta clase se calculará el número de resource blocks que hacen falta para que cada usuario pueda llevar a cabo el servicio que tiene asociado. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$ResourceBlocks = \frac{Capacidad}{Eficiencia * BW * Rb}$$

En la cual:

*Capacidad*: Es la capacidad necesaria por el servicio que va a emplear el usuario.

*Eficiencia*: Eficiencia espectral calculada anteriormente, y que se lee de los parámetros del usuario.

*BW \* Rb*: Es el ancho de banda por cada recurso, 180kHz.

Se guardarán también en los parámetros de usuario.

- **Potencia de la estación base**

Una vez se han obtenido los Resource Blocks se puede calcular la potencia total que tiene que emplear la estación base hacia ese usuario para que la comunicación correspondiente sea satisfactoria.

Para ello se aplica:

$$Potencia(W) = \frac{P_{Tx} * ResourceBlocks}{CapacidadEstacion}$$

Siendo:

$P_{Tx}$ : Es la potencia a la que transmite la estación base, que se obtiene del archivo de configuración.

*CapacidadEstacion*: La capacidad total, en Resource Blocks, de la estación base.

*ResourceBlocks*: El número de bloques calculados en la clase anterior.

Una vez obtenido este valor se tendrá todo lo necesario para realizar los cálculos correspondientes al enlace descendente.

### 3.3.2 Enlaces ascendentes

En este subapartado se indicarán los diferentes módulos creados para este tipo de enlaces. No se seguirá el mismo esquema que en el de bajada, pues se parte desde otro punto, comenzando con el cálculo de la SINR experimentada por el servicio al conectarse a la estación base.

Además, en los enlaces ascendentes se supondrá que no hay interferencia, ya que el sistema está principalmente limitado por el ruido.

- **SINR**

Para ello se utilizarán las pérdidas de propagación que se habían guardado en los parámetros de usuario anteriormente.

La expresión empleada será:

$$SINR(dBW) = P0 - L - N$$

Donde:

$P0$ : Es un parámetro específico de los móviles, que se supone igual en cualquier terminal, con un valor estándar de -80dBW [7].

$L$ : Serán las pérdidas por propagación, tomadas de los parámetros de usuario.

$N$ : Es el ruido térmico calculado al multiplicar  $K * T * BW$ , igual que en el cálculo de la SINR del enlace descendente.

Además, se tendrá en cuenta un factor de compensación de las pérdidas ( $\alpha$ ), que puede tomar valores 0 ó entre 0.4 y 1. Se fija en el archivo de configuración, y varía dependiendo del tipo de usuario que se seleccione. Finalmente se tiene que:

$$SINR (dBW) = P0 - (L * (1 - \alpha) - N)$$

Este cálculo se hará con todas las estaciones a las que pueda conectarse el usuario y se selecciona finalmente aquella con la SINR máxima, para realizar las operaciones posteriores.

También se guardarán en un mapa las SINRs obtenidas de cada estación, con su identificador y las pérdidas correspondientes. Este mapa se ordenará de mayor a menor SINR, para poder realizar más fácilmente la búsqueda posteriormente.

- **Eficiencia espectral**

Con el dato de la mejor SINR, y sabiendo a qué estación se conectará el usuario, se procederá al cálculo de la eficiencia espectral del enlace entre ambos, por lo que se utiliza la relación de Shannon:

$$Eficiencia(bits/s/Hz) = \log_2 (1 + SINR)$$

Este cálculo se realizará, para todos los usuarios, limitándola a 5, para reflejar una situación real.

- **Resource Blocks**

Se calcula igual que en el caso del enlace descendente, mediante la expresión:

$$ResourceBlocks = \frac{Capacidad}{Eficiencia * BW * Rb}$$

La única variación será que la eficiencia espectral será la calculada para este enlace.

- **Potencia de usuario**

Tras el cálculo anterior ya es posible obtener la potencia mínima a la que tiene que emitir el usuario para poder comunicarse con la estación seleccionada, que será aquella con la que necesitará menor potencia, debido a que habrá menores pérdidas entre ellos, fundamentalmente debido a la distancia que les separe. En este cálculo intervienen los siguientes factores:

$$Potencia (dBW) = \min \{P_{max}, P_0 + 10 * \log_{10} M + L * (1 - \alpha)\}$$

$P_{max}$ : Es el valor máximo al que puede emitir el terminal del usuario, fijado en -6 dBW [7].

$P_0$ : Es el parámetro utilizado en el cálculo previo de la SINR (-80 dBW).

$M$ : Número de Resource Blocks establecidos anteriormente.

$L * (1 - \alpha)$ : Son las pérdidas de propagación compensadas.

De estos dos cálculos se escogerá el mínimo, guardándolo en los parámetros de usuario.

### 3.3.3 Clases comunes para ambos enlaces

Por último, una vez calculados todos los parámetros de los 2 enlaces, se describirán otros módulos que utilizarán ambos enlaces.

- **Pintar**

En esta clase se volcaran en un fichero los resultados calculados anteriormente, para que posteriormente puedan ser procesados.

Para ello se leerá de los parámetros de usuario todos los datos registrados, plasmando todo en dos ficheros diferentes, uno para el enlace ascendente y otro para el descendente, correspondiéndose cada línea de estos ficheros con un usuario diferente.

- **Conexiones**

Todas las clases descritas hasta ahora han considerado que la estación a la que se conecten los usuarios les aceptarán sin tener en cuenta que tienen recursos limitados, diferentes para los enlaces ascendentes y descendentes, denominados capacidad.

Esta clase será la encargada de leer la capacidad de las estaciones para ambos enlaces, y determinar los Resource Blocks empleados en el servicio que tienen asociados los usuarios. Además, actualizará la capacidad restante de la estación.

Así, se recorrerá el contenedor de usuarios, y se irá restando de las capacidades de las estaciones lo empleado por cada uno de ellos, en subida y bajada, indicando lo que queda en cada BS. Si en algún caso no se pudiera conectar debido a que se ha gastado la capacidad de una determinada estación se indicaría; considerando que los usuarios posteriores que quisieran conectarse a ella no pudieran cursar sus servicios, añadiéndolos a la cuenta de servicios perdidos.

Esto se verá indicado en un fichero en el que se plasmará la estación a la que se conectará el usuario en subida y en bajada, la capacidad que está gastando en ambos enlaces, y la capacidad restante de las estaciones. En otro fichero se indicara, ordenándose por indicador de estación, la capacidad disponible una vez se han conectado todos los usuarios y el total de la carga que han introducido los mismos, en cada una de ellas, para los 2 enlaces.

- **Comparación**

Este módulo se encargará de preparar el escenario para poder realizar la comparación entre utilizar las técnicas DUDe y no hacerlo.

Para ello, obtendrá de los parámetros de usuario la estación a la que se conectará en el enlace descendente el usuario, y leerá el mapa creado en la

clase SINR de subida, fijando que se conecte a la misma estación que en bajada, actualizando posteriormente todos los parámetros.

Es decir, tras ejecutar esta clase sería posible comparar lo obtenido al emplear DUDe y al utilizar una solución tradicional.

## **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS**

### **4.1 Planteamiento de escenarios**

Una vez explicada la herramienta, los módulos añadidos a la misma, así como las múltiples modificaciones que se han ido realizando a lo largo de todo el proceso, se procederá a explicar los resultados obtenidos. Previamente se plantearán todos los datos utilizados para realizar los diferentes despliegues, ya que LTE tiene muchas posibilidades, pero no es posible analizar todas las posibilidades.

- Estaciones base:

Se empezará planteando el tipo de estaciones seleccionadas, en este caso se plantearán 10 escenarios diferenciados por el número de estaciones (micro células) con los que cuenten variando de 10 a 50. Además, 1 estación formará una macro célula, que se situará en el centro del área que se va a tratar. Esta área será de dimensiones  $2000 \times 2000 \text{ m}^2$ , y cualquier despliegue que se realice se hará dentro de ella; Se considerará de tipo urbana, lo cual se tendrá en cuenta en el cálculo de las pérdidas de propagación. La BS de la macrocélula da cobertura a todos los usuarios que haya desplegados, se supone que utilizando una potencia total de 16 dBW. A priori, esta sería la opción preferida por la mayoría de usuarios para conectarse en el enlace descendente, pues aunque las pérdidas de propagación dependen principalmente de la distancia que haya entre la estación y los usuarios, al emitir a una potencia mucho mayor que las microcélulas, en la mayoría de los casos llegará una potencia mayor a los usuarios aunque estén más alejados.

Además contará con una capacidad de 100 Resource Blocks, pues trabaja con 20 MHz, no utilizará sectorización, y tendrá una ganancia de transmisión de 18 dB y una de recepción de 0 dB.

Las microcélulas emitirán a una potencia mucho menor, 0dBW, potencia típica de las picocélulas debido al tamaño del escenario [8], con una cobertura entre 200-300 metros; además sus capacidades serán una cuarta parte de la de la macrocélula, 25 ResourceBlocks, con un ancho de banda de 5 MHz. A su vez, no dispondrán de sectorización y tendrán una ganancia de transmisión de 18 dB y de recepción de 0 dB.

La situación de estas microcélulas se calculará de manera que abarquen toda el área, permitiendo que cualquier usuario tenga acceso a, por lo menos, una de ellas.



- Usuarios y servicios:

En este caso se utilizarán 2 tipos diferentes de usuarios, los cuales se diferencian por el servicio que estén cursando, además el usuario determina el parámetro que compensará las pérdidas de propagación en el enlace ascendente, utilizando los valores 0.6 y 0.8, para comprobar la variación que esto produce. La potencia máxima a la que podrán transmitir los usuarios será -6 dBW (0.2511 w), que será la utilizada en caso de que la potencia de emisión calculada sea inferior. A su vez, se les asignará el parámetro  $P_0 = -80$  dBW específico de los usuarios (todos tendrán el mismo) y una ganancia de transmisión de 0 dB.

Se asignarán 2 servicios diferentes, uno más pesado que el otro, de cara a hacer comparaciones y analizar el efecto sobre las cargas de las estaciones.

El primero será un equivalente de un servicio de voz, y el segundo se corresponde con un servicio de datos con mayor demanda.

Tabla.4.1. Características de los servicios utilizados.

	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>
<b>Capacidad (kbps) <math>T_o</math></b>	100	1000
<b>% de usuarios que lo emplean %s</b>	65	35
<b>Tiempo de servicio (s) <math>T_s</math></b>	40	100
<b>Tiempo medio entre llegadas (s) <math>T_{llegadas}</math></b>	60	800

En cuanto al número de usuarios empleado será variable, incrementándose desde 50 a 300 usuarios en pasos de 50. Con estos datos se podrá obtener el tráfico medio de la red, mediante la siguiente expresión:

$$T_o = N^{\circ} \text{ de usuarios} * \left( \%s1 * T_{oS1} * \frac{T_{s1}}{T_{llegadas1}} + \%s2 * T_{oS2} * \frac{T_{s2}}{T_{llegadas2}} \right)$$

Sustituyendo los datos incluidos en Tabla 4.1, y con el máximo de usuarios (300) se obtendrá un tráfico medio ofrecido de 26.115 MBps.

Una estación de una macrocélula es capaz de soportar 90 MBps sin saturarse, como se ve a partir de la siguiente ecuación:

$$NRB = \frac{To}{S * BwRB} \rightarrow To = 90MBps$$

Siendo:

$S$ : La eficiencia espectral ,5 (el máximo posible).

$NRB$ : La capacidad, 100 tal como se ha indicado antes.

$BwRB$ : 0.18, Ancho de banda por Resource Block en MHz.

Por tanto, y teniendo en cuenta que el tráfico máximo en la red sería inferior a la capacidad de la macrocélula, y que éste se va a repartir utilizando a su vez microcélulas, se puede concluir que la red no se llega a saturar.

Con todos estos datos se procede a elaborar las trazas de los usuarios, ya que para cada escenario se van a ejecutar 10 repeticiones, con 360 iteraciones de cada una de ellas.

Estas trazas de usuarios indicarán la posición en cada momento de cada uno de ellos, y el tipo de servicio que utiliza ese usuario, comprobando si está o no está activo. En caso de que no esté activo no se realizará cálculo alguno para ese usuario, pues con ello indica que no quiere utilizar ningún servicio en ese momento, lo que ahorrará tiempo de ejecución pues habrá muchos usuarios inactivos.

## **4.2 Resultados iniciales para un escenario con despliegue de usuarios aleatorio**

En este subapartado se comentarán los diferentes resultados obtenidos de los módulos explicados en el capítulo 3, para ello se mostrarán diferentes gráficas obtenidas mediante el uso de Matlab de los datos elaborados con la herramienta, dependiendo de factores como el número de usuarios, la posición de los mismos, el número de repeticiones realizadas, el factor de compensación de pérdidas de propagación empleado, el número de estaciones de tipo micro, etc.

Además, habrá diferenciación entre los 2 tipos de enlaces, indicando por separado sus resultados y, por último, comparándolos, para explicar las diferencias al utilizar DUDe y LTE tradicional.

Todos los datos expuestos en este subapartado se obtienen para un escenario con 10 micro estaciones situadas las posiciones indicadas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Posición de las micro estaciones en el escenario

Posición x	Posición y
0979.22	1306.09
0781.05	0511.14
0087.53	0619.28
0418.98	0030.16
1130.76	1505.74
1629.82	1966.31
1266.79	0155.67
0517.99	1507.53
0075.11	0533.13
1832.61	1588.39

A su vez se despliegan 50 usuarios, los cuales tendrán activos o no los servicios en cada iteración, en función de lo indicado en las trazas, y cuya situación geográfica se calculará aleatoriamente; además, el factor de compensación de pérdidas de propagación utilizado será 0.6.

En este caso no se incluirán gráficas comparativas o de los valores promedio, ya que se incluirán en el 4.2.3.

#### 4.2.1 Enlace descendente.

Lo primero que cabe destacar en una comunicación descendente estación-terminal es la potencia recibida por el usuario. Esta potencia será la clave de este tipo de enlace pues, una vez seleccionada la estación de la que mayor potencia se recibe se podrán realizar los posteriores cálculos para caracterizarlo.

Con los datos introducidos, 50 usuarios, 360 iteraciones y 10 repeticiones debería haber en el eje Y 180.000 puntos diferentes, pero teniendo en cuenta que solo alguno de ellos quieren establecer un servicio en cada iteración y, que otros no entran dentro del rango de cobertura de las estaciones por recibir SINRs de menos de -10 dBW, estos “usuarios activos” se reducen a aproximadamente 45.000.

En la Figura 4.1 se aprecia que las potencias recibidas por los usuarios abarcan un rango entre 0 y 4  $\mu$ W. Aunque la gran mayoría se sitúan en los valores más bajos (picoWattios), como se observa en la Figura 4.2. Las potencias analizadas vienen de la selección entre las recibidas de las diferentes estaciones.

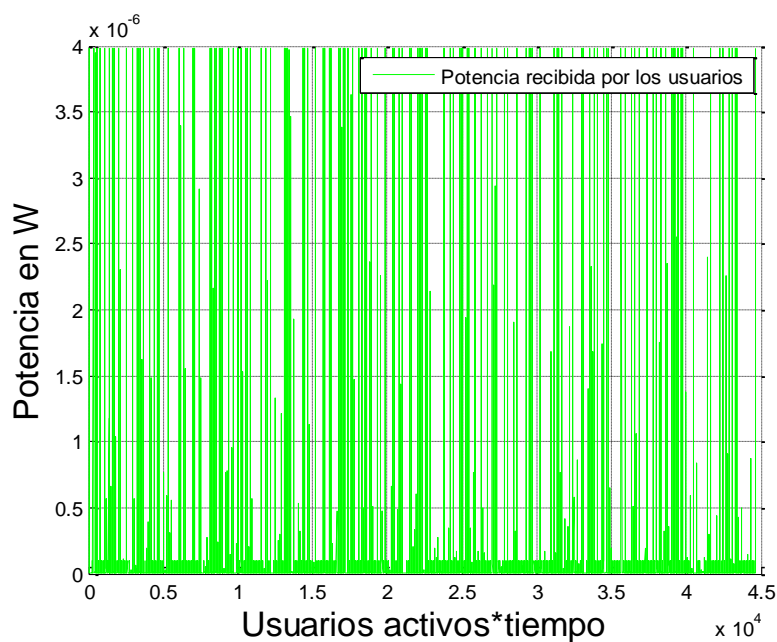


Figura 4.1. Potencia en W recibida por usuario activo.

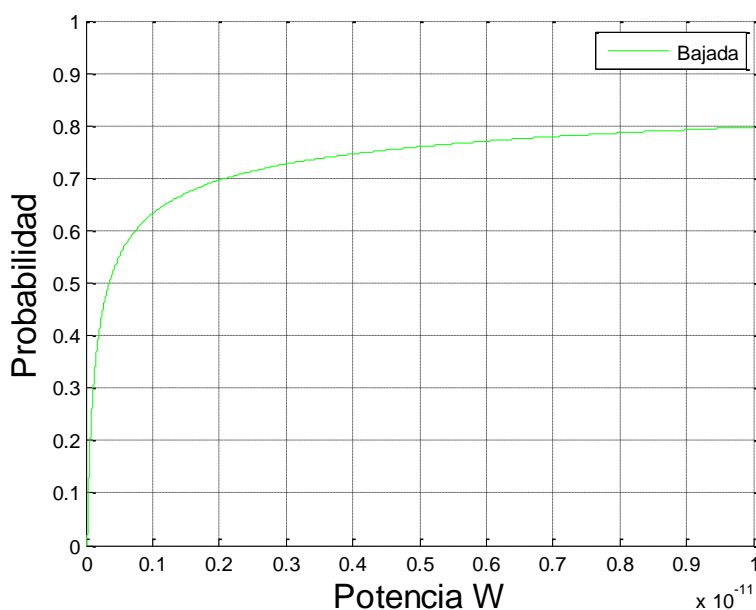


Figura 4.2 CDF Potencias recibidas por usuario activo.

La SINR como se aprecia en la Figura 4.3, estará comprendida, principalmente, entre -10 y 70 dB, dependiendo de la potencia recibida vista previamente. A partir de 18 dB, la eficiencia espectral será 5. La mayor parte de SINRs (90%) se sitúan por debajo de 30 dB.

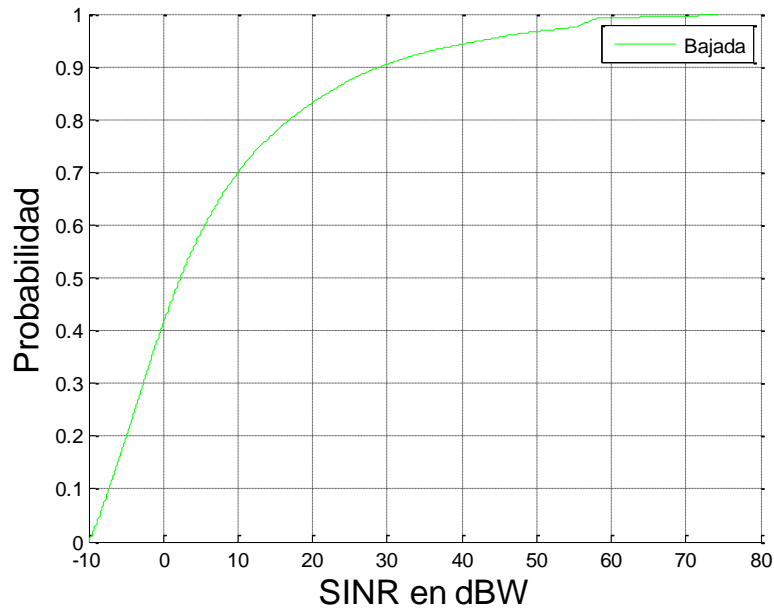


Figura 4.3. CDF de la SINR en dBW por usuario activo.

Obtenida la SINR para cada usuario activo, se puede calcular la eficiencia espectral del canal, representada en la Figura 4.4.

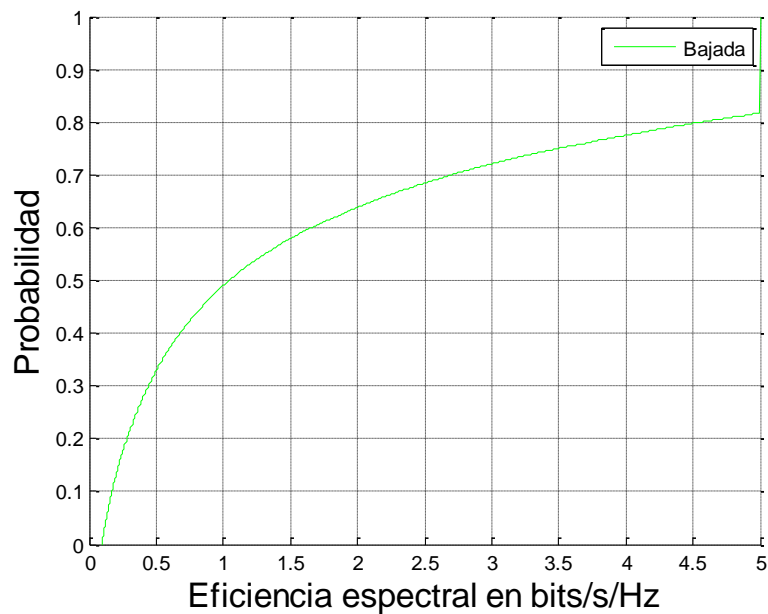


Figura 4.4. CDF de la Eficiencia (bits/s/Hz) por usuario activo.

Como se puede ver, estará comprendida entre 0 y 5, con un valor medio de aproximadamente 2. Nunca podrá ser 0, pues la SINR mínima es -10; además, una eficiencia muy baja incrementa notablemente el número de Resource Blocks necesarios para establecer el servicio.

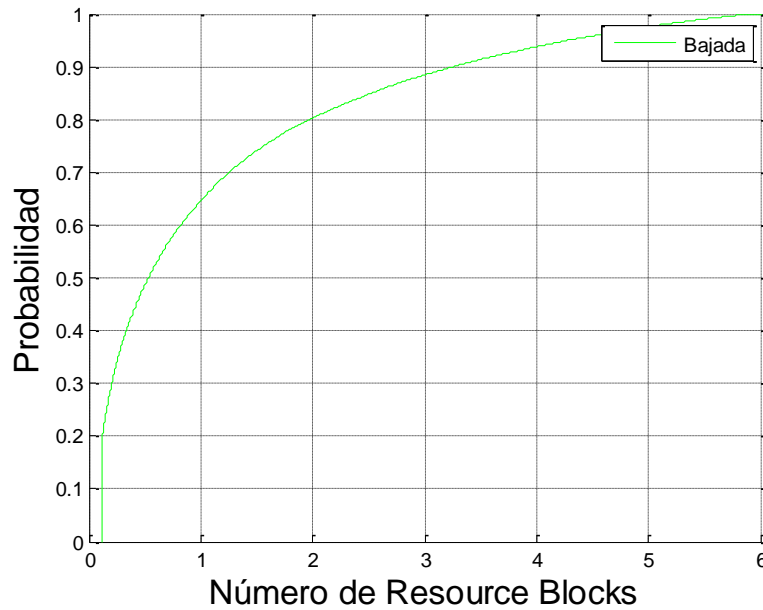


Figura 4.5 CDF del número de Resource Blocks por usuario activo.

En este caso, en la Figura 4.5, se muestran los Resource Blocks necesarios para poder llevar a cabo el servicio, observando que el rango está entre 0 y 6, exceptuando algún caso extremo, con baja eficiencia y servicio de tipo 1 que, combinados, disparan el número de recursos que se necesitan. La media de uso de estos recursos es de 1.1, aproximadamente.

Por último, se observará en las Figuras 4.6 y 4.7 la potencia transmitida en  $W$  para cada uno de los usuarios activos, desde la estación base de la que se recibe mayor potencia en ese momento puntual.

Los picos de potencia que se aprecian se deben a que, a mayor necesidad de Resource Blocks, mayor potencia transmitirá la estación base por usuario. Por último, destacar que, por lo general, esta potencia está entre 0 y 2  $W$ , con un valor medio de, aproximadamente 0.2  $W$ .

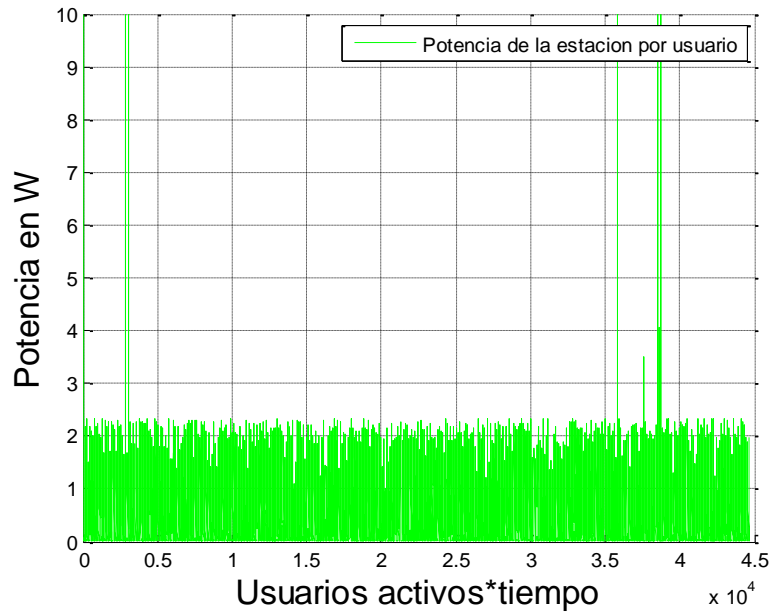


Figura 4.6. Potencias emitidas por las estaciones en W.

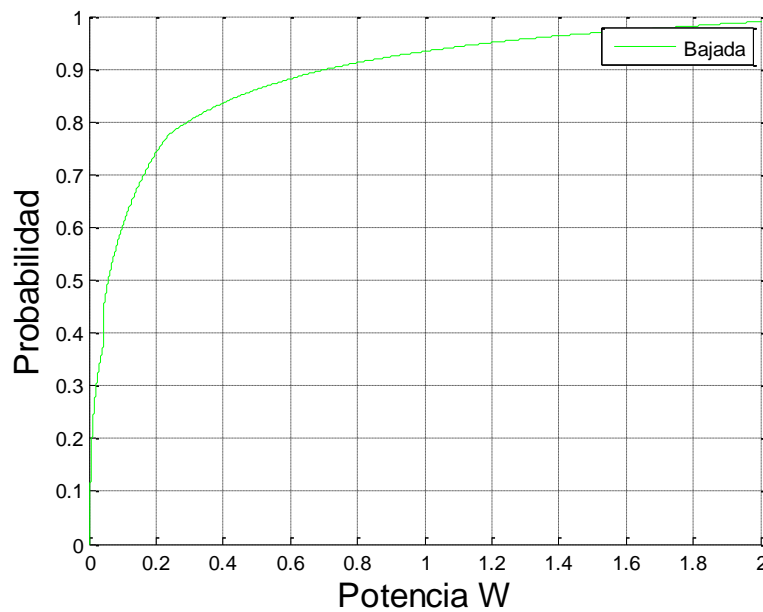


Figura 4.7 CDF de las potencias emitidas por las estaciones en W.

#### 4.2.2 Enlace ascendente.

En este subapartado se mostrarán las características del enlace ascendente, tanto utilizando DUDe como con un enfoque más tradicional, dejando para el siguiente la comparación de los mismos y lo obtenido en bajada.

Para comenzar se muestra la SINR obtenida en la Figura 4.8, la cual es bastante peor al no utilizar DUDe, ya que en vez de conectar a la estación que

menores pérdidas de propagación ofrezca, se fuerza a conectar a la misma del enlace descendente, que podrá estar más lejos o existir mayores pérdidas de propagación.

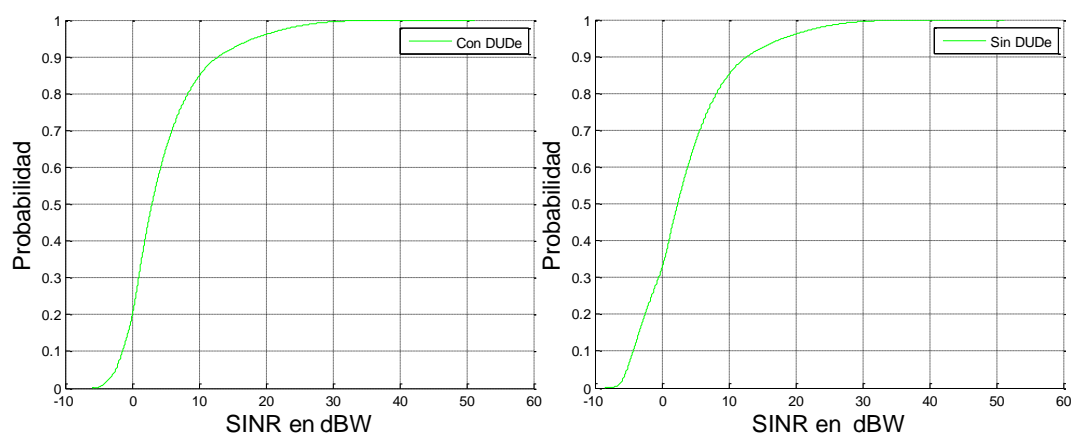


Figura 4.8. CDFs de las SINRs en dB por usuario activo, con y sin DUDe.

El cálculo de las eficiencias espectrales puede observarse en la Figura 4.9, resultando inferior al no utilizar DUDe, tal y como se indicara en el siguiente subapartado. Esta eficiencia espectral estará, aproximadamente, en torno a 2.1 con su utilización y 1.7 sin ella.

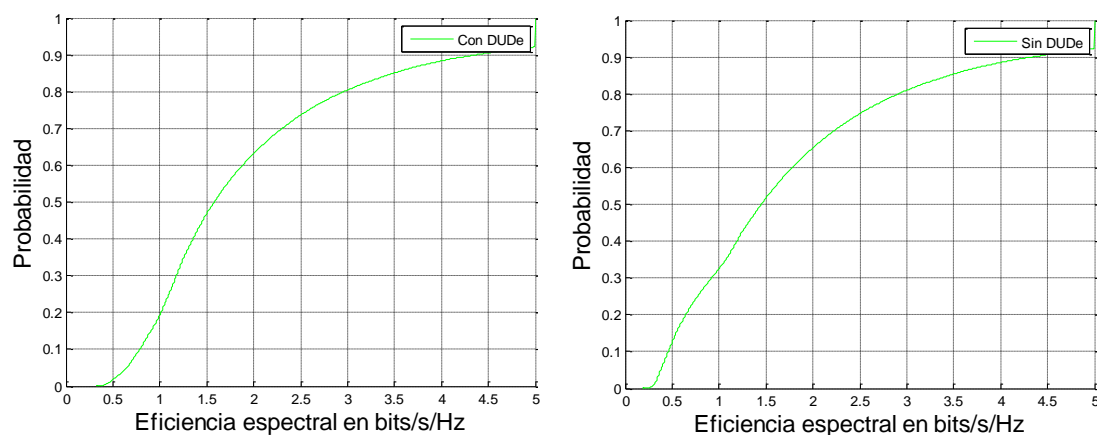


Figura 4.9. CDFs de las eficiencias espectrales (bits/s/Hz) por usuario activo, con y sin DUDe.

Con las eficiencias espectrales disponibles, es posible la obtención de los Resource Blocks necesarios, en este caso, en la Figura 4.10.



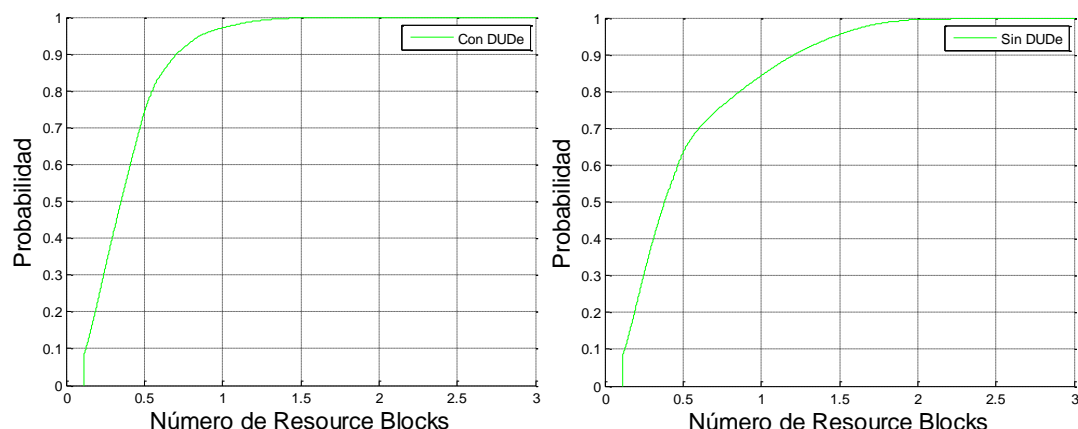


Figura 4.10. CDFs de los Resource Blocks necesarios por usuario activo, con y sin DUDe.

Por último, se podrá obtener la potencia a la que debe transmitir el usuario para establecer el enlace ascendente con la estación, en las Figuras 4.11 y 4.12, apreciando la necesidad de aumentar cuantiosamente la misma en caso de no utilizar esta técnica.

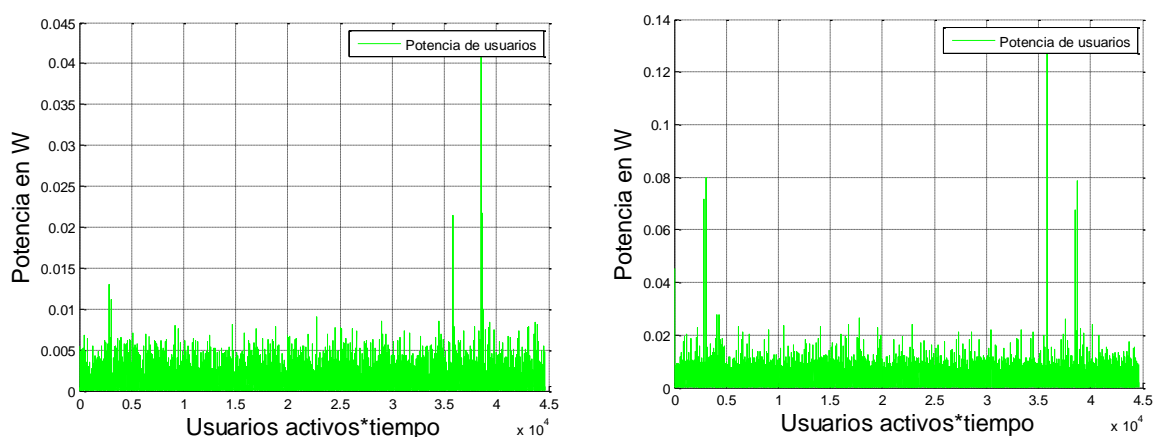


Figura 4.11. Potencias emitidas en W por usuario activo, con y sin DUDe.

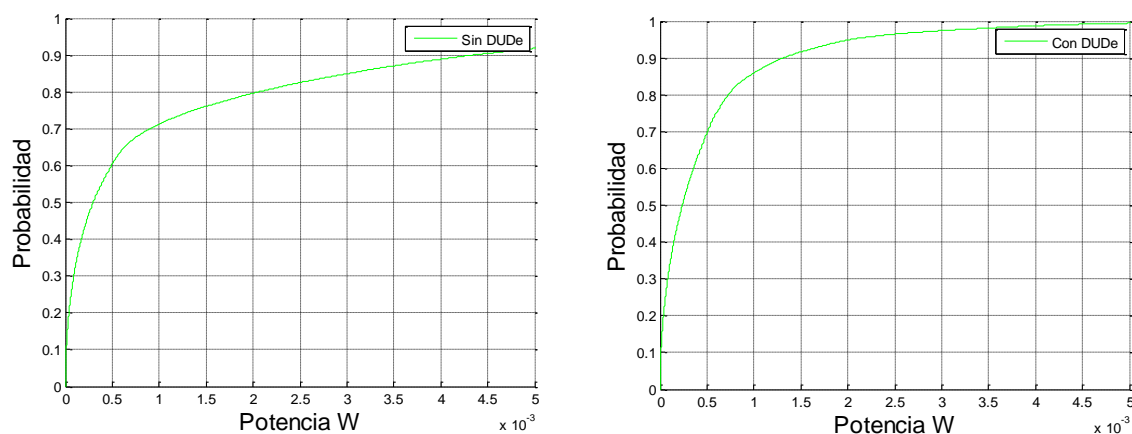


Figura 4.12. CDFs de las potencias emitidas en W por usuario activo, con y sin DUDe.

#### 4.2.3 Comparación de resultados, cargas por estación y servicios.

Para concluir con este apartado se procederá a comparar el comportamiento al usar DUDe y no, analizando las diferencias de la distribución de las cargas en las estaciones, de los servicios y los tipos empleados.

Si se obtiene la media de las potencias emitidas por los usuarios (ver Figura 4.13), se observa la potencia transmitida se reduce de 1.3 mWatts a 0.52 mWatts.

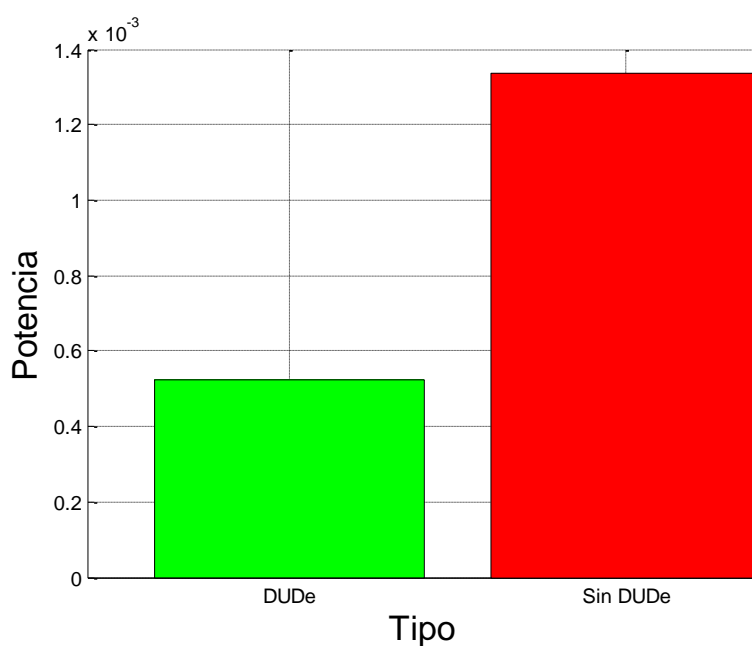


Figura 4.13. Media de potencias emitidas en W por los usuarios activos, con y sin DUDe.

Además, al calcular la CDF en la Figura 4.14, esta mejora se observa de una manera mucho más clara. Por ejemplo: el 85% de los usuarios de DUDe emplean una potencia inferior a 0.001 W, cosa que solamente harían el 70% de los de LTE tradicional. Además se consigue estabilizar la potencia transmitida.

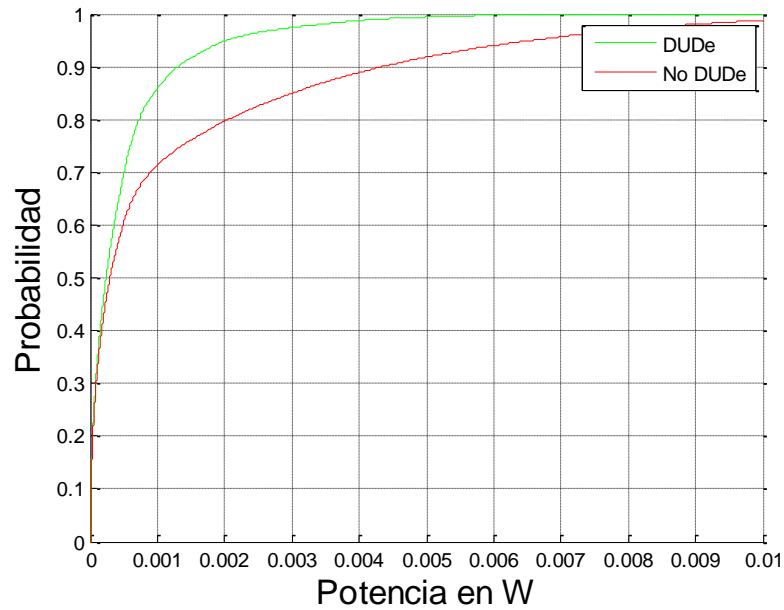


Figura 4.14. CDF Potencias emitidas por los usuarios activos, con y sin DUDe.

El siguiente paso será comparar las diferentes SINRs, lo que se recoge en la Figura 4.15, observando la clara mejoría que logra DUDe con respecto a LTE, y poniendo de manifiesto que la de los enlaces descendentes será superior en media que la del ascendente.

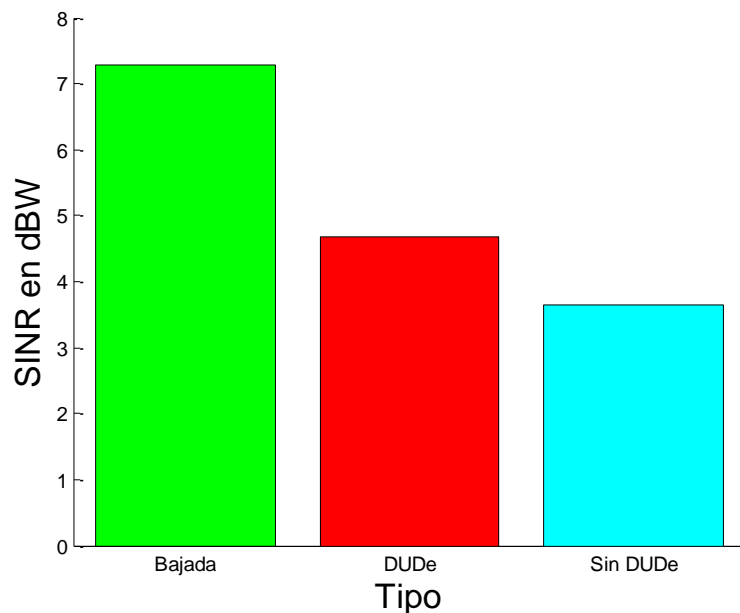


Figura 4.15. Comparación en media de la SINR de bajada, y subida, con y sin DUDe.

La mejora del enlace ascendente se debe principalmente a la elección de una mejor estación por la que transmitir, permitiendo establecer un canal con mayor calidad.

Además, la SINR del canal descendente es superior, pues la mayoría de las conexiones de bajada se establecen con la BS macro, que emite una potencia 16 dBW, lo cual, incluso con la atenuación que sufre por un mayor Pathloss, resulta favorable.

La Figura 4.16 muestra la CDF de la SINR, en la que se aprecia de una manera clara este aspecto, ya que al menos el 50% dispondrán de SINRs superiores en el enlace ascendente, apreciando que la gran mayoría estará entre 0 y 10 dB. En bajada sin embargo la SINR crece mucho más, pero también hay valores muy inferiores lo que causa un peor rendimiento conjunto de la red, por la gran variabilidad.

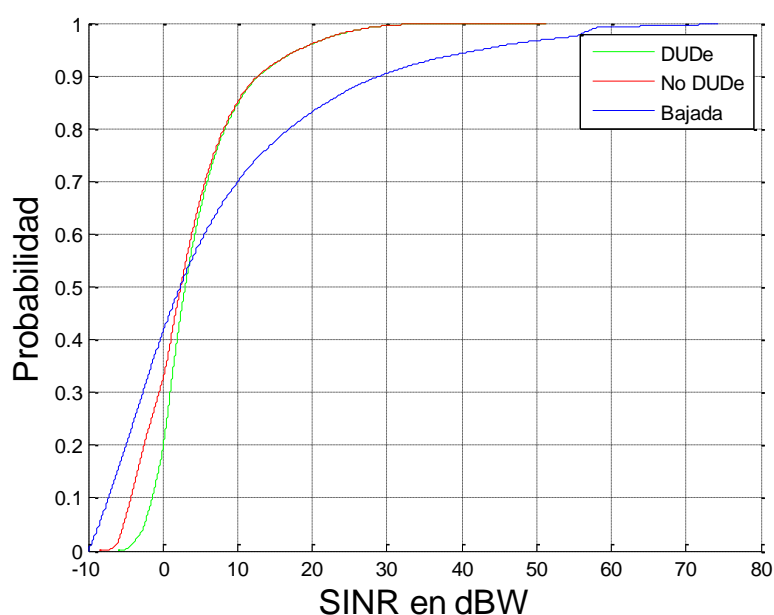


Figura 4.16. CDF SINR del enlace ascendente, con y sin DUDe, y descendente.

Sin embargo, la eficiencia espectral favorece al enlace ascendente que emplea DUDe, como se ve en la Figura 4.17, pues se emplea una fórmula diferente en la subida, tal y como se indicó en el capítulo 3. Esta sería inferior en condiciones normales, pero la introducción de DUDe la incrementa aproximadamente un 10%, permitiendo superar la del descendente.

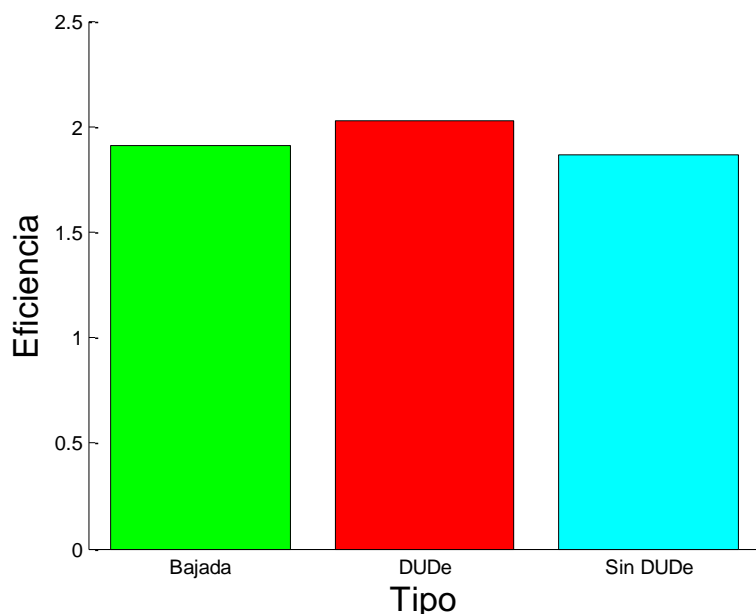


Figura 4.17. Comparación en media de la eficiencia espectral (bits/s/Hz) de bajada, y subida, con y sin DUDe.

Para complementar lo expuesto la Figura 4.18 muestra las CDFs de las eficiencias. Se aprecia que a partir del 65% de usuarios la eficiencia resulta superior en bajada, aunque en media quede inferior, hay un porcentaje de usuarios que disponen de una eficiencia mayor. También queda manifiesto que la eficiencia de subida es más estable que la de bajada, pues crece más rápido y no es tan variable en función de los usuarios.

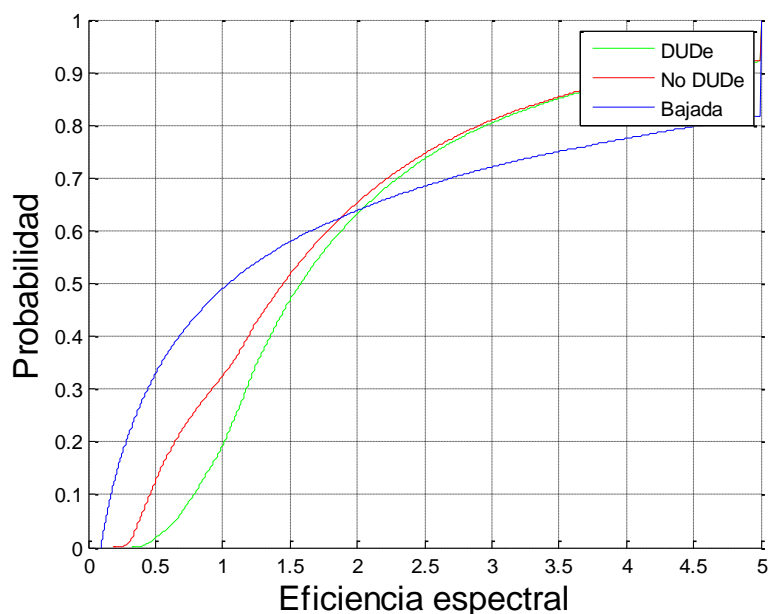


Figura 4.18. CDF eficiencia espectral (bits/s/Hz) de bajada, y subida, con y sin DUDe.

Para terminar con este bloque de resultados, se compararán los Resource Blocks, que como muestran las Figuras 4.19 y 4.20, seguirán la tendencia de los parámetros anteriores, empleando menos al utilizar DUDe que con una solución tradicional.

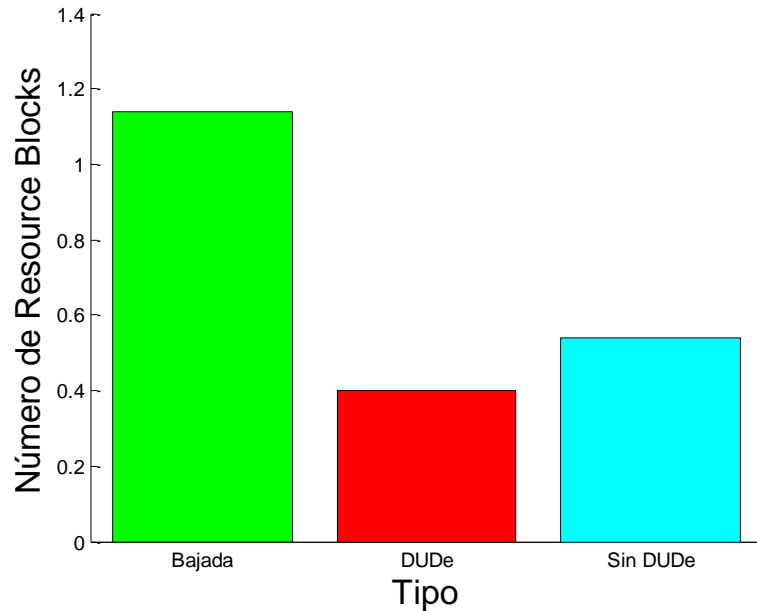


Figura 4.19. Comparación en media de Resource blocks utilizados en bajada y subida (con y sin DUDe).

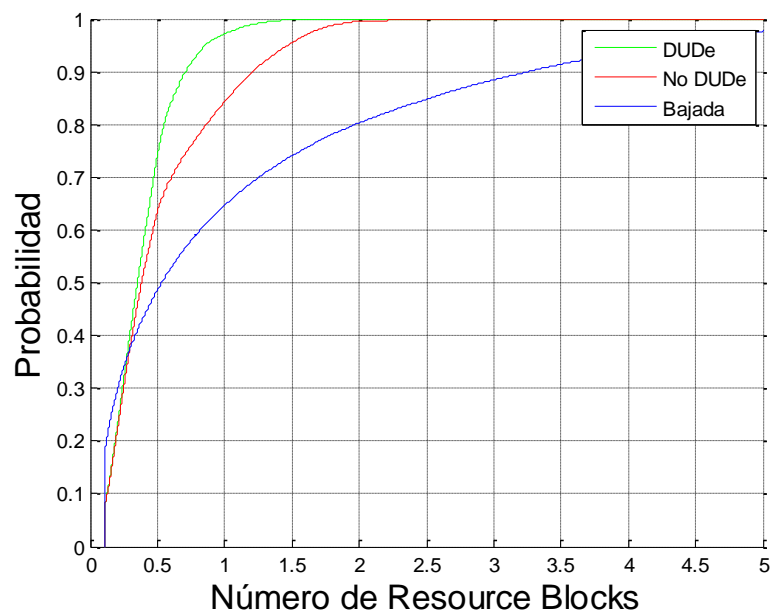


Figura 4.20. CDF de Resource blocks utilizados en bajada y subida (con y sin DUDe).

Esta diferencia entre la bajada y la subida se debe a que coinciden servicios muy grandes con eficiencias muy pequeñas en descarga, lo que acentúa esta conclusión, aunque el 50% de usuarios emplearán un número similar de Resource blocks.

Al centrarse en la subida se aprecia que la gran mayoría de los usuarios utilizan menos de 0.5 Resource blocks, mientras que sin utilizar DUDe, hay un 30% de usuarios que aumentan esta media, empleando entre 1 y 2.5 recursos.

Ahora se procederá a analizar las cargas de las estaciones en los 3 casos posibles, a partir de las CDFs correspondientes. Como ya se ha explicado en el capítulo 2, el empleo de DUDe consigue un balanceo de carga mucho más óptimo, pues reparte el tráfico entre todas las estaciones y no carga en exceso una. Esto queda claro observando la Figura 4.21, donde se compara la carga en el enlace descendente con el del ascendente en LTE. Se ve que que, aunque el ascendente necesite menos Resource Blocks, se carga únicamente la estación 1 (la macro), quedando las demás muy infrautilizadas, al no establecerse apenas enlaces con ellas.

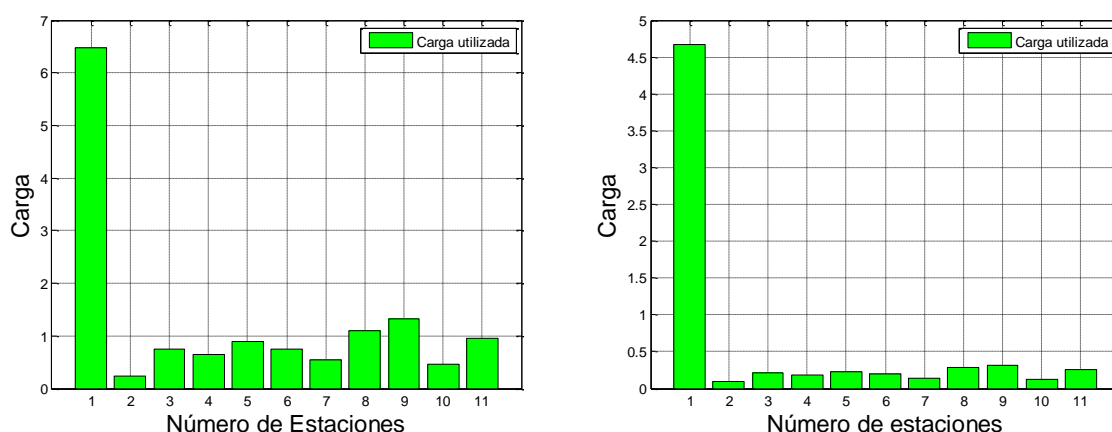


Figura 4.21. Reparto de carga media por estaciones en el enlace descendente y ascendente sin DUDe.

Sin embargo, tal y como se aprecia en la Figura 4.22, la utilización de las micro estaciones en DUDe es muy superior, quedando la carga completamente distribuida entre estas. Lo cual permitiría, en caso de incorporar más usuarios o que estos tengan activos más servicios, que no se sobrecargaran las estaciones, haciendo un uso más eficiente de las estaciones desplegadas, con lo que la inversión económica en ellas se amortizaría con mayor rapidez, mejorando además la utilización conjunta de la red.

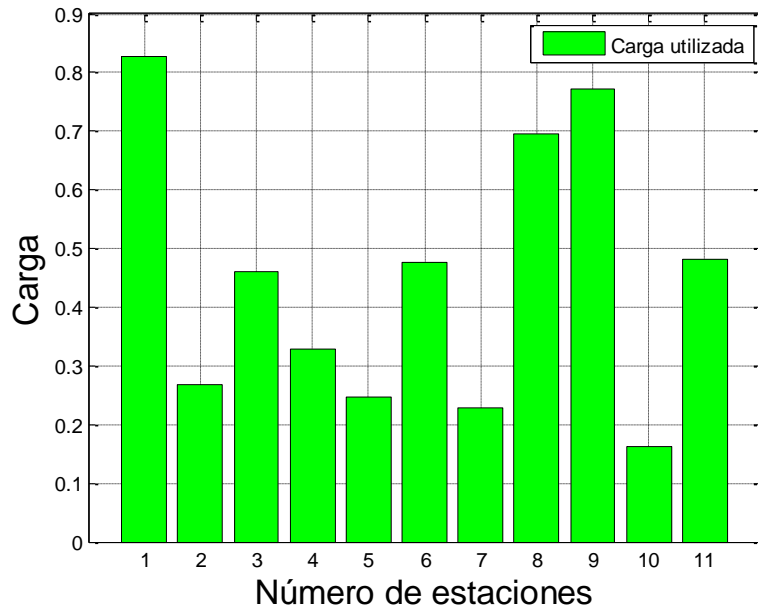


Figura 4.22. Reparto de carga media por estaciones en el enlace ascendente con DUDe.

En cuanto a los servicios, la Figura 4.23 muestra los activos para 50 usuarios en cada una de las fotografías, resultando conectados si la estación tiene capacidad disponible, en el supuesto que esté en su zona de cobertura. Es posible obtener la media de los mismos y como se ve en la Figura 4.24, resulta que se cursa un mayor número de los de tipo 1, tal y como se había planteado anteriormente. Por último se han calculado los servicios perdidos.

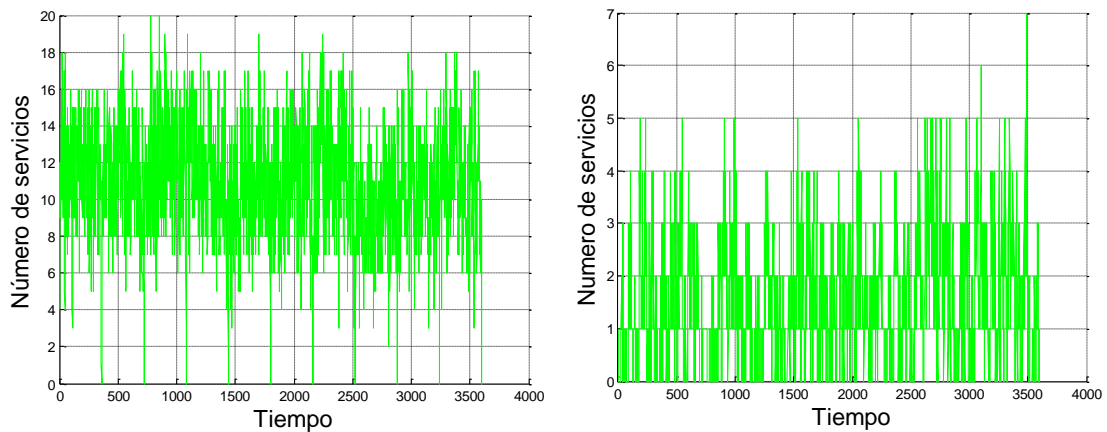


Figura 4.23. Número de servicios de tipos 1 y 2 activos en la red.



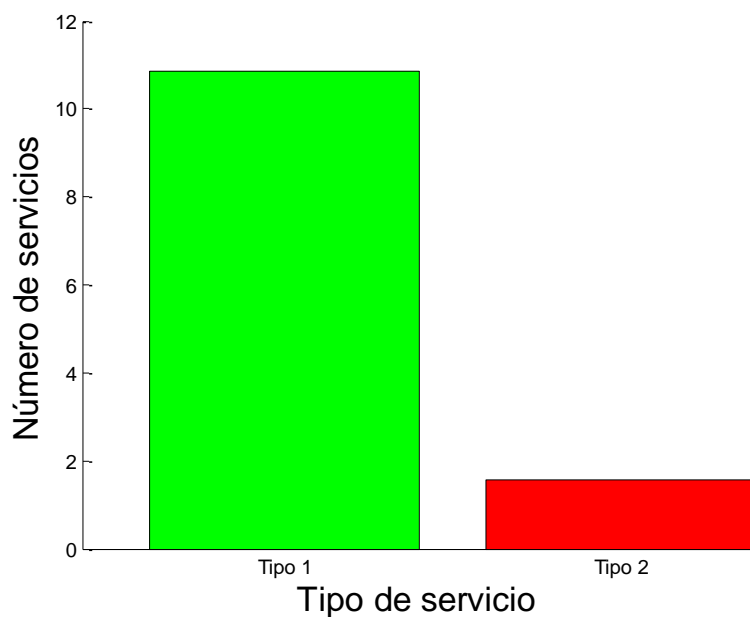


Figura 4.24. Media de servicios activos de tipo 1 y 2.

La Figura 4.25 muestra las CDFs correspondientes, por lo general, hay más servicios que se pierden que los de tipo 2, en el conjunto de las comunicaciones que se realizan en la red.

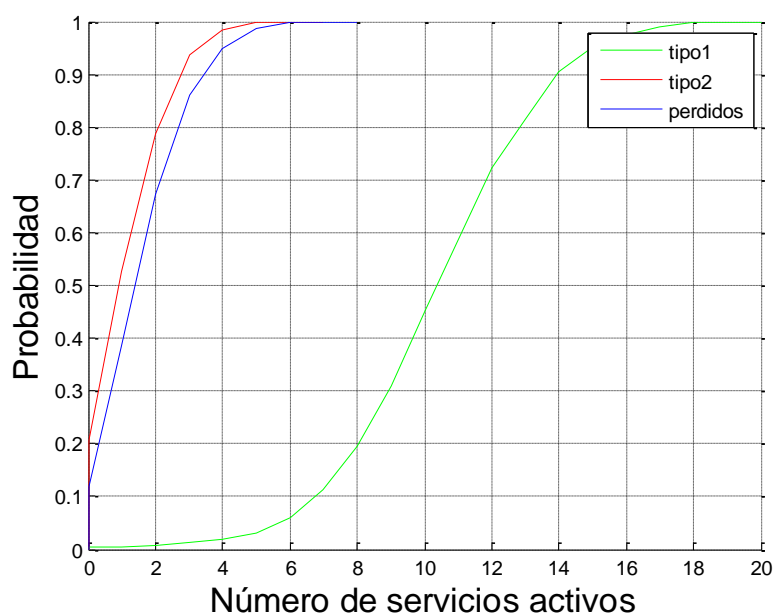


Figura 4.25. CDFs de servicios cursados y perdidos por grupo de 50 usuarios.

Para concluir este apartado, en la Figura 4.26 se muestran las diferencias de utilizar DUDe y LTE tradicional a hora de repartir estos servicios entre las diferentes estaciones, a su vez se incluirá el reparto en bajada.

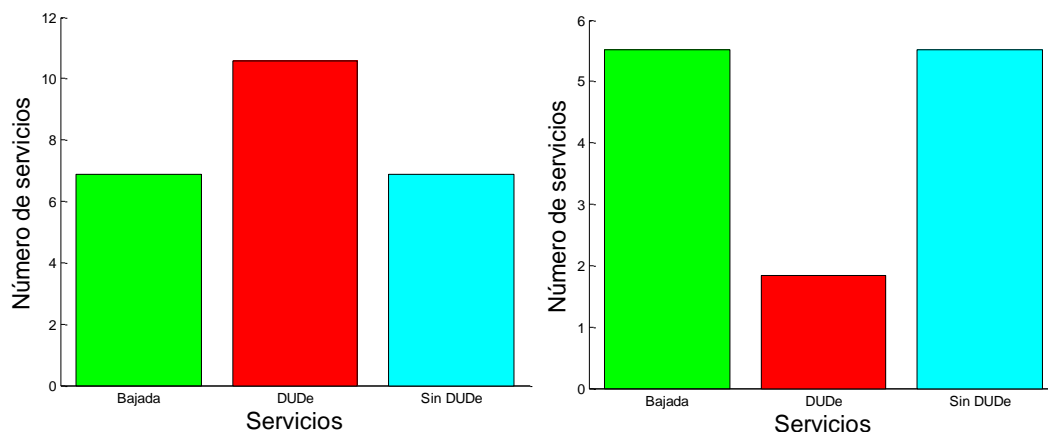


Figura 4.26. Comparación servicios activos en macro y micro estaciones.

Como se aprecia, en los enlaces descendentes y ascendentes tradicionales el reparto de servicios es el mismo, mientras que al utilizar DUDe las micro células cobran una relevancia mucho mayor, fundamentando aún más el reparto de carga optimizado que se ha explicado anteriormente. Por último, la Figura 4.27 muestra las CDFs correspondientes, comprobando el crecimiento del uso de servicios en función del porcentaje de usuarios.

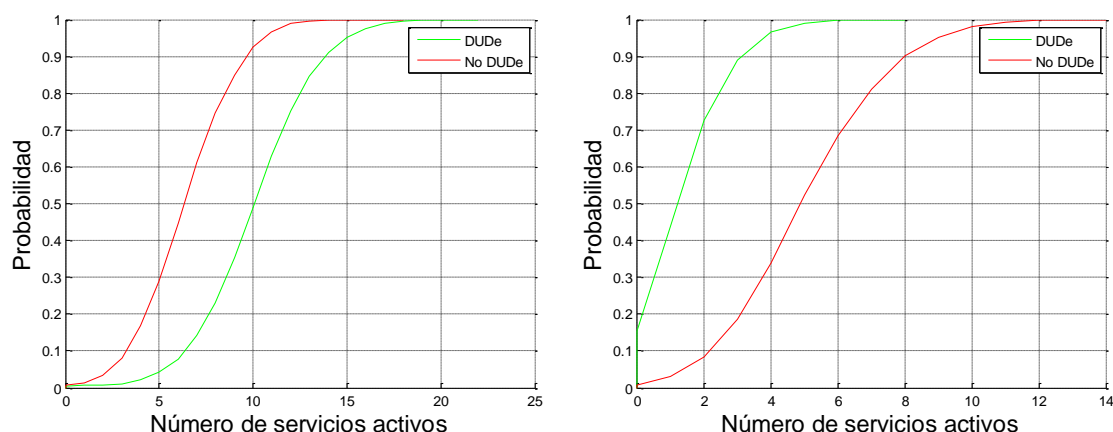


Figura 4.27. CDFs Servicios en macro y micro estaciones, con y sin DUDe.

### 4.3 Evaluación de resultados avanzados en el enlace ascendente

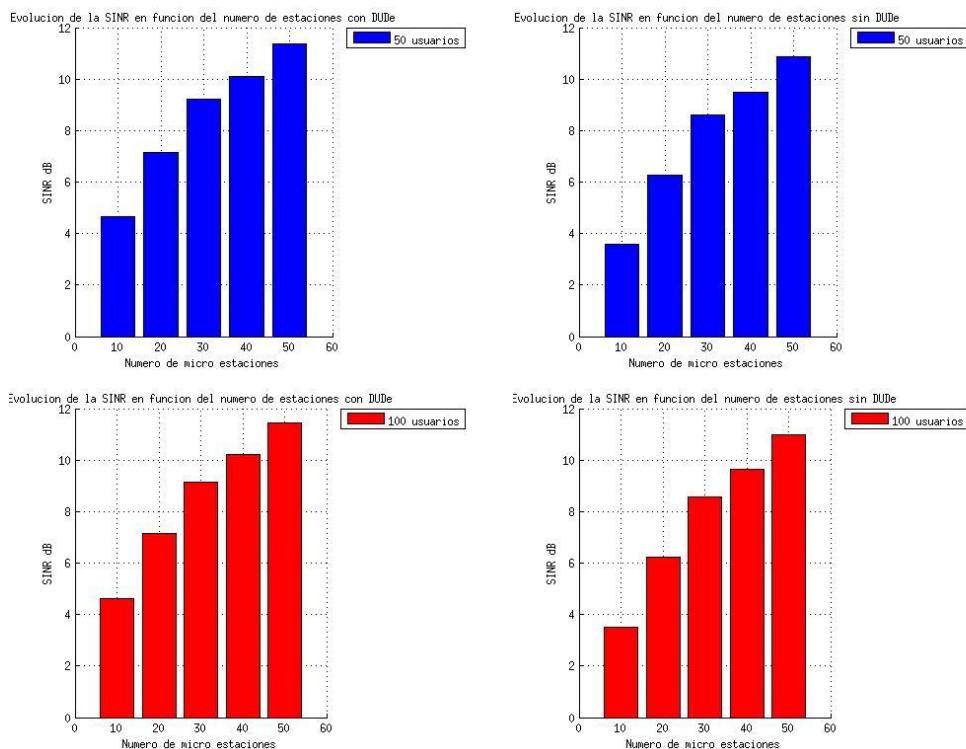
Una vez explicados todos los resultados obtenidos para un caso concreto se procederá a realizar un análisis del enlace ascendente para varios despliegues, incrementando de 10 a 50 las micro estaciones, y un número de usuarios variable entre 50 y 300.

Con los datos obtenidos, en lugar de realizar un estudio tan exhaustivo como en el apartado anterior se realizarán gráficas comparativas en función de los parámetros ya indicados, indicando si el uso de las técnicas DUDe mejora un escenario de manera superior o inferior al variar los mismos.

El uso de 300 usuarios no llega a saturar ninguna estación base, como se mostrará más adelante, sin embargo, a partir de 450 usuarios, y empleando pocas micro estaciones, sí que se podría experimentar falta de capacidad en alguna de ellas. Esto llevaría a un mayor número de servicios caídos en la comunicación, o a la imposibilidad de conectar a ciertos usuarios que así lo requirieran.

Al no saturarse las estaciones, y despreciar la interferencia en este tipo de enlaces en función del ruido, no se apreciará un cambio significativo al incrementar el número de usuarios, pues no influyen entre ellos. Esto lleva a que las gráficas comparativas sean muy similares entre sí, variando notablemente en función del número de micro estaciones desplegadas.

A continuación, se muestra la evolución de las SINRs, eficiencias espectrales, Resource Blocks y potencias utilizadas por los usuarios para cada escenario, en función de estas estaciones. Para la obtención de estas graficas se ha realizado la media de las 360 iteraciones en las 10 repeticiones para cada una de los 5 casos de número de estaciones y los 6 casos de número de usuarios con un  $\alpha = 0.6$ . También se utilizó el valor 0.8, pero los resultados obtenidos fueron muy similares, independientemente del número de estaciones y usuarios, ya que, con  $\alpha = 0.8$ , el impacto del pathloss a la hora de calcular la SINR es muy reducido, por lo que quedan excesivamente favorables (SINRs > 20 dBW).



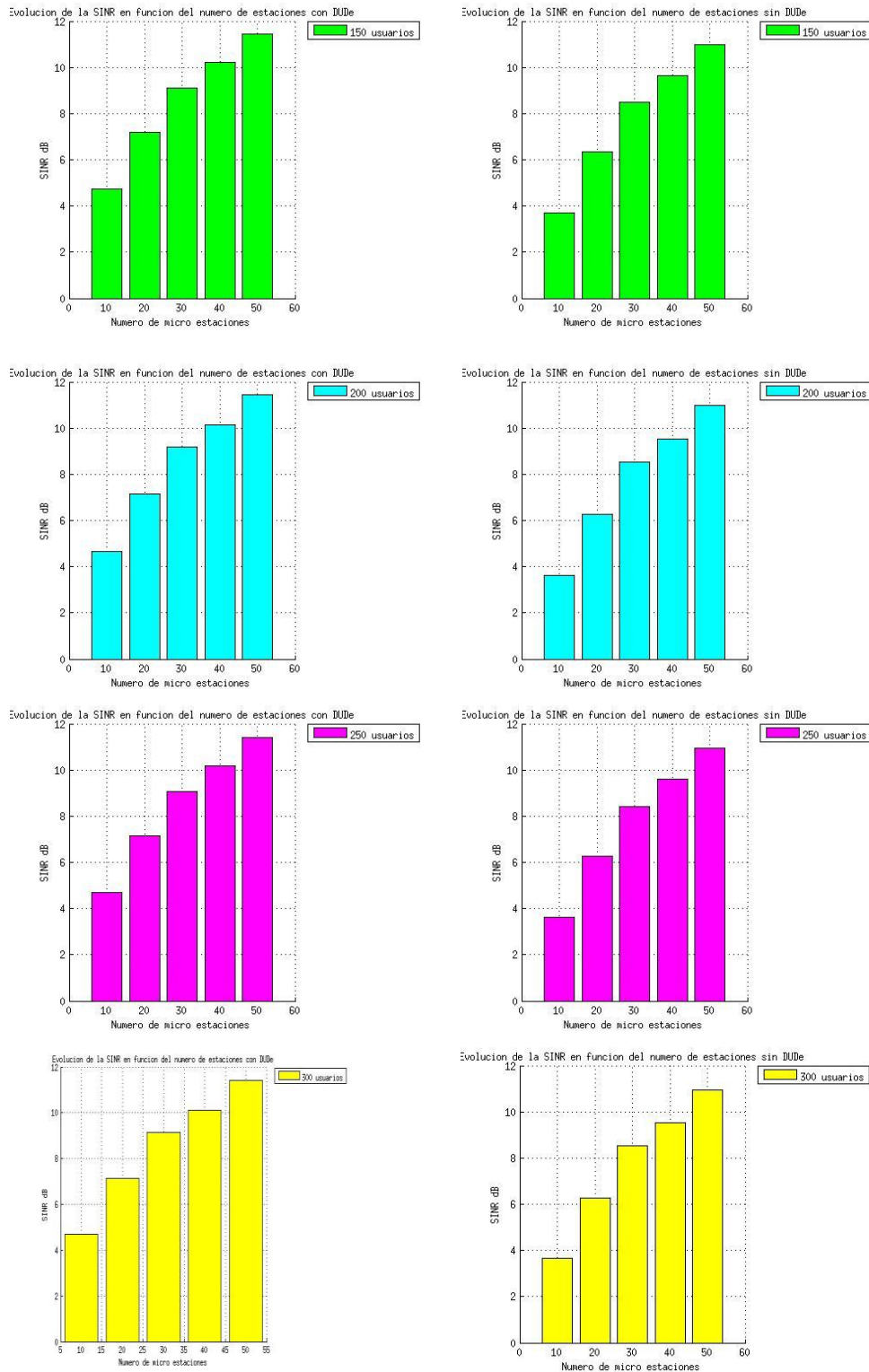


Figura 4.28. Evolución de la SINR, en dBW, en función del número de estaciones, con y sin DUE, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 usuarios.

Como puede apreciarse en la Figura 4.28, el incremento de estaciones influye muy positivamente en el cálculo de la SINR, llegando a triplicarse, ya que, al haber más opciones para conectarse, la selección de estación será más óptima. Además, tal y como se observa, este incremento es más relevante al principio, cuando se incrementa de 10 a 20 ó de 20 a 30 estaciones, a partir

de 30 ya hay suficientes alternativas para obtener una SINR muy elevada y a partir de ahí, aunque importante, podría decirse que no es tan necesario para obtener un canal lo suficientemente estable para transmitir. Este suavizado en el incremento a partir de 30 estaciones se aprecia claramente en la Figura 4.29.

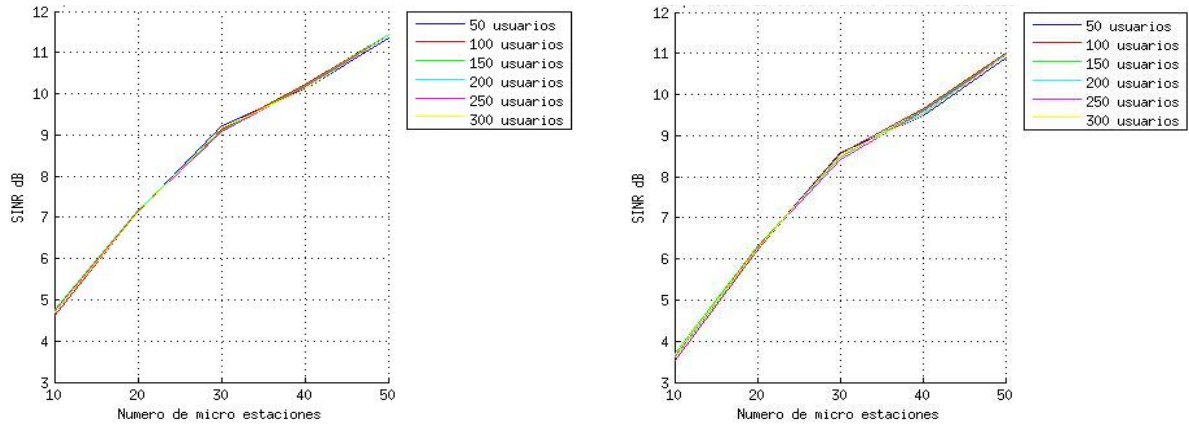
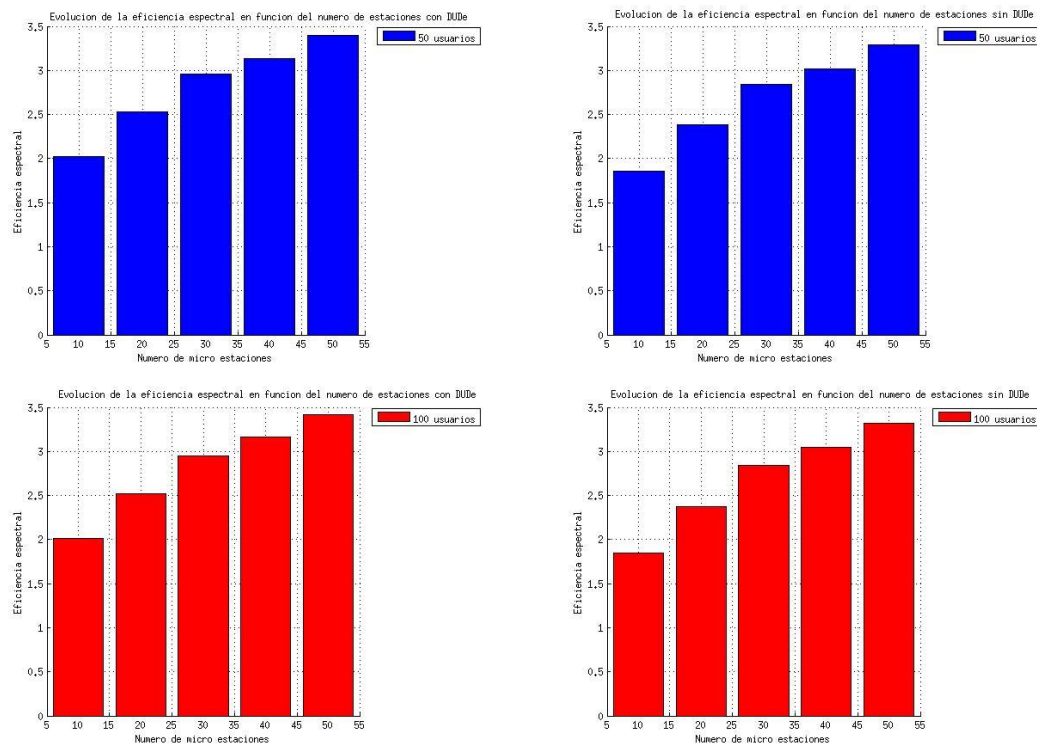


Figura 4.29. Comparación de SINR en dBW entre usuarios por número de estaciones.

La principal diferencia al emplear DUDe, aparte de obtener mayores SINR, es que es mucho más eficaz al emplear pocas estaciones, con una mejora notable en dBW. Por ejemplo, al emplear 10 estaciones con DUDe, se obtiene una SINR cercana a 5 dBW, mientras que en LTE se obtiene una de 3.5 dBW aproximadamente. Sin embargo, al desplegar 50 estaciones el incremento se queda en poco más de 0.5 dBW, es decir, casi 3 veces menor.



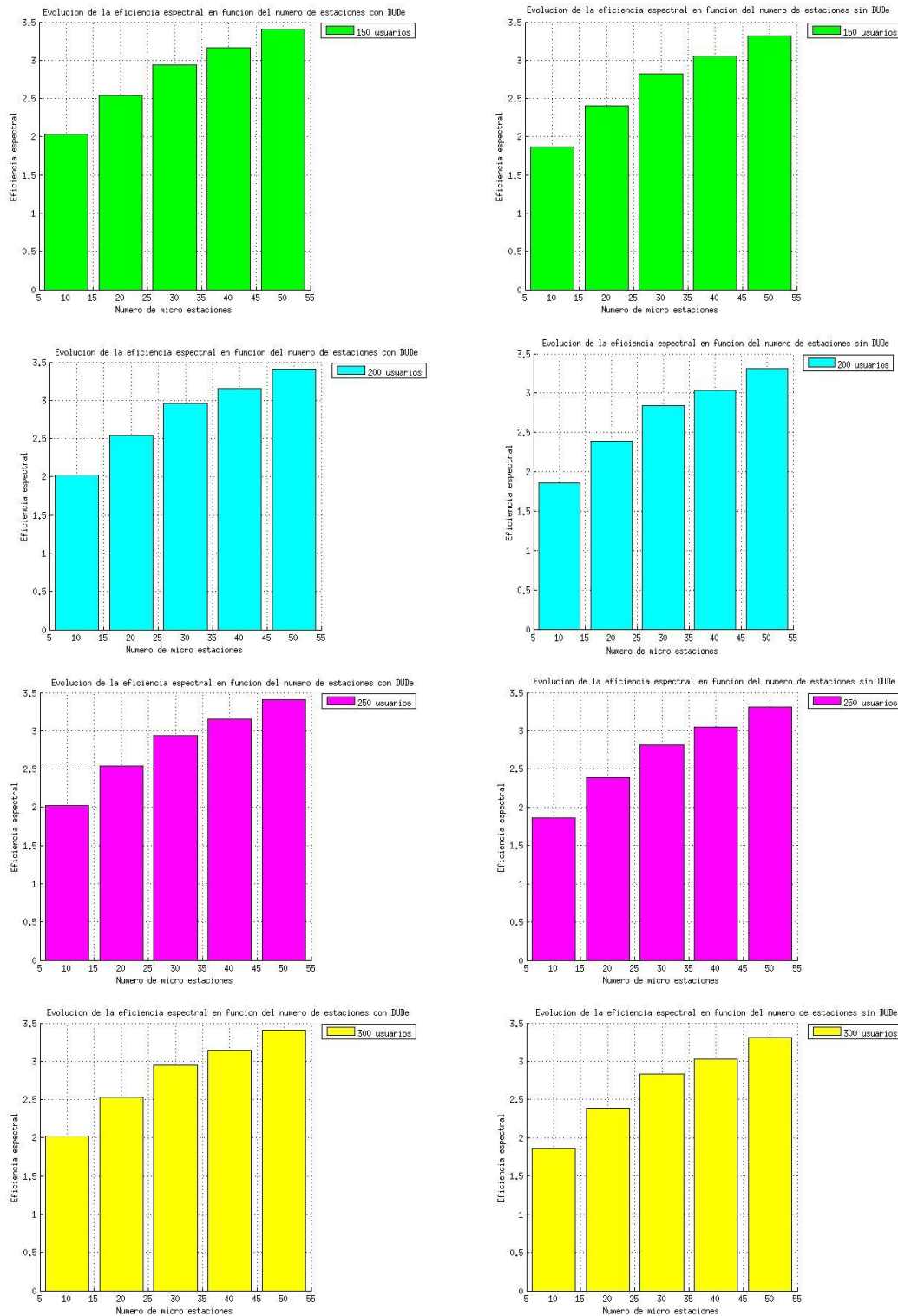


Figura 4.30. Evolución de la eficiencia espectral en función del número de estaciones, con y sin DUE, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.

La Figura 4.30 muestra la evolución de la eficiencia espectral; al igual que con la SINR, al aumentar las estaciones se incrementa notablemente este parámetro, apreciando un gran incremento al variar de pocas estaciones a un mayor número, reduciéndose la ganancia al seguir incrementando las estaciones desplegadas.

Además se aprecia de una mejor manera la variación al emplear técnicas tradicionales en lugar de DUDe, notando que, por ejemplo, empleando DUDe con 30 estaciones se obtiene aproximadamente la misma eficiencia que en una solución tradicional con 40. Lo cual podría llevar a un ahorro importante en infraestructuras, pues se podría garantizar una eficiencia muy similar con un menor número de estaciones.

La diferencia en la evolución al emplear DUDe y no emplearlo se observa de manera más apreciable en la Figura 4.31, observando que a partir de 30 estaciones se obtiene una menor mejora.

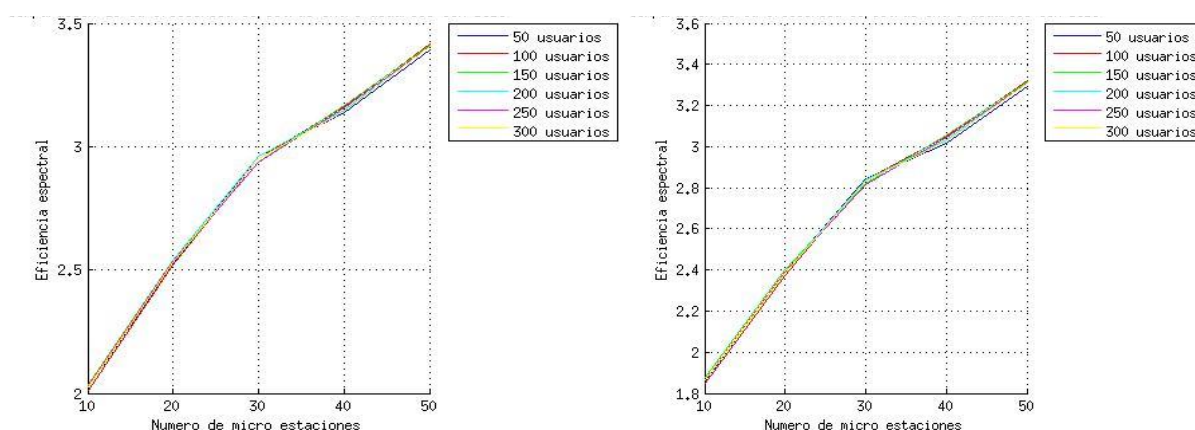
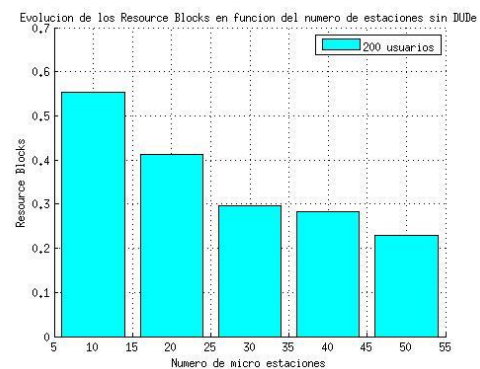
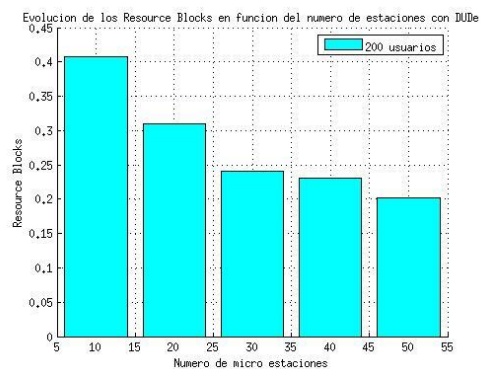
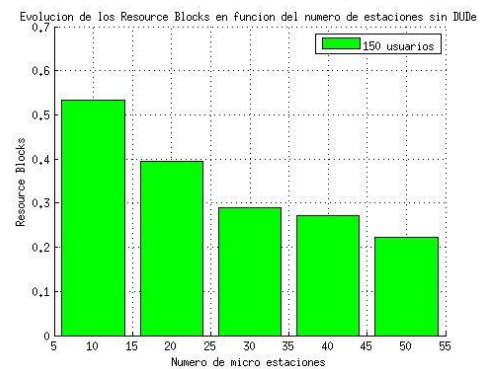
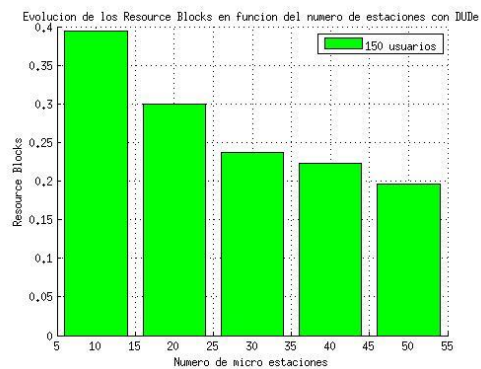
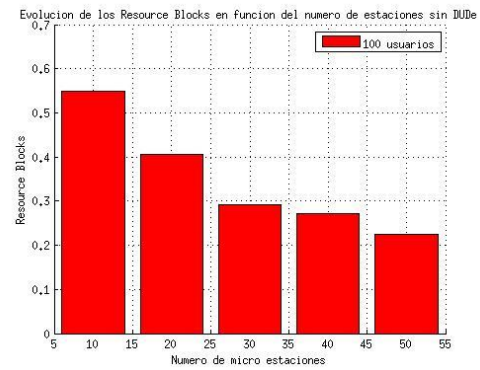
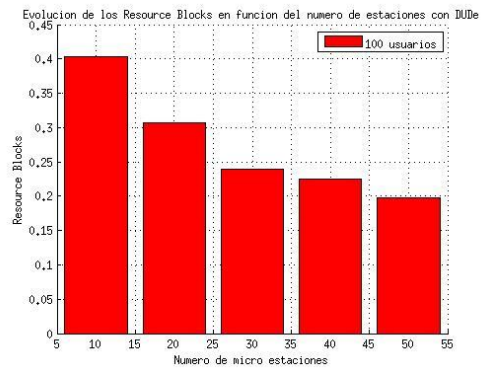
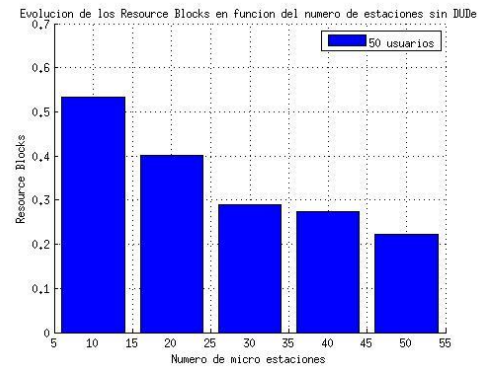
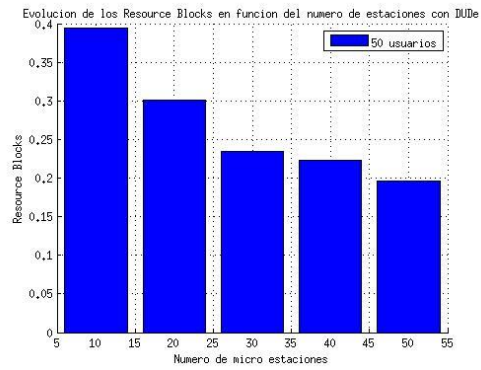


Figura 4.31. Comparación de eficiencia espectral entre usuarios en función del número de estaciones

A continuación la Figura 4.32 presenta los resultados de los Resource Blocks, observando la enorme reducción de los mismos al incrementar las estaciones, y la gran variación que se produce al utilizar DUDe, lo que permite que con un número inferior de estaciones se emplee el mismo número de recursos que en una solución LTE tradicional (aproximadamente 0.4 para 10, 0.4 para 20; 0.3 para 20, 0.3 para 30), esto es un ahorro importante y permite que se establezcan más conexiones con el mismo número de estaciones, o da pie a una reducción del uso de las mismas, con el ahorro de costes que esto proporciona.







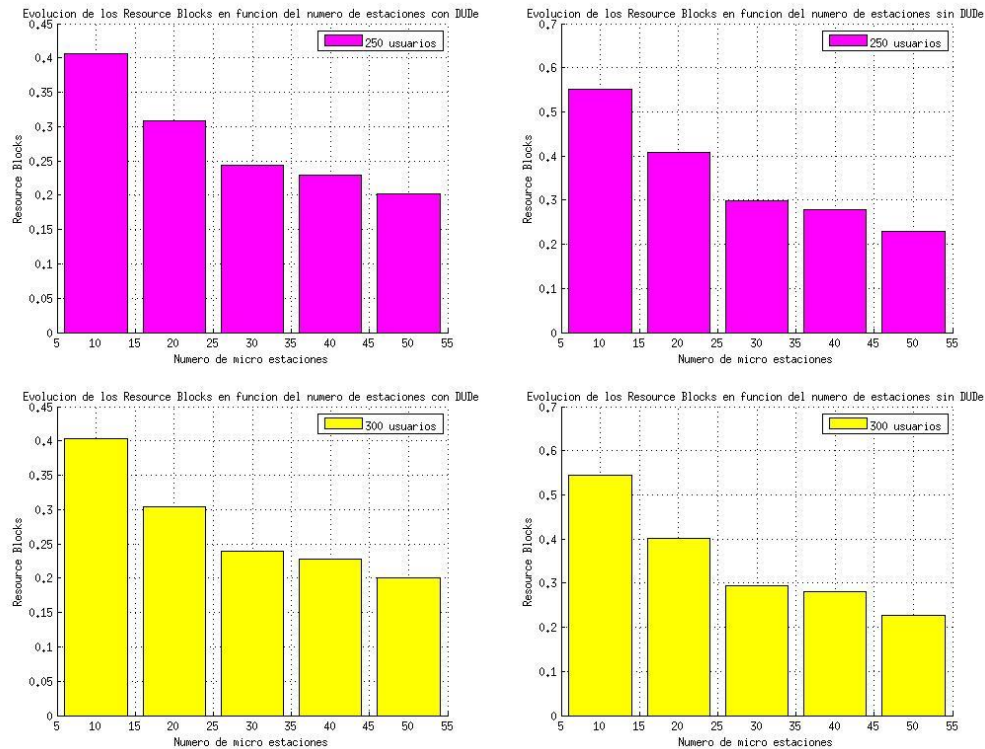


Figura 4.32. Evolución del número de Resource Blocks en función del número de estaciones, con y sin DUE, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 usuarios.

Nuevamente, se incluye la comparación al variar los usuarios en el escenario, en la Figura 4.33, lo que permite apreciar la reducción en el uso de estos recursos, viéndose que con muchas estaciones se emplean prácticamente los mismos, al utilizar y no DUE, además de que con el incremento de estaciones se beneficia al LTE tradicional, pues su curva se reduce de una manera mucho más pronunciada.

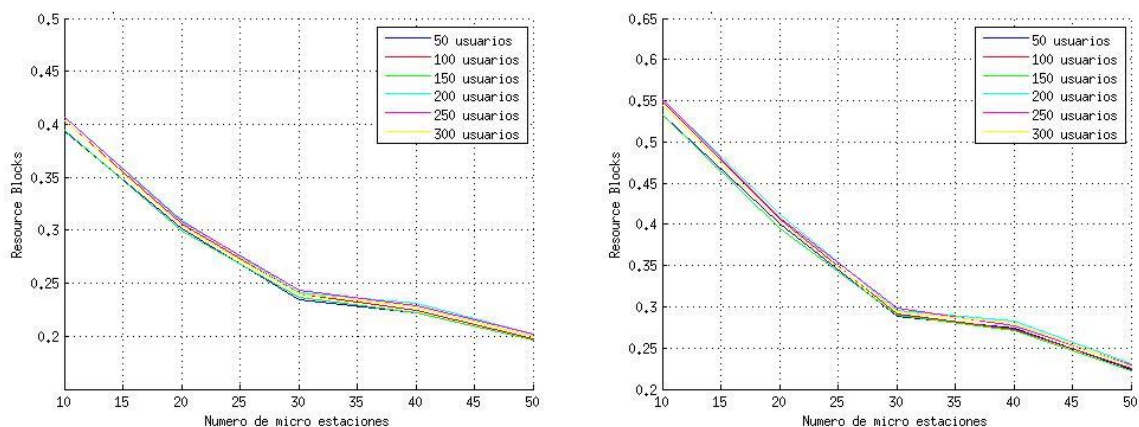
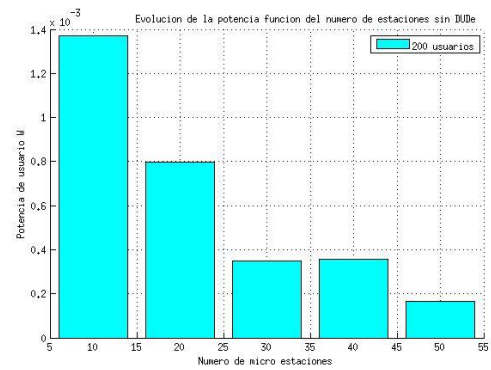
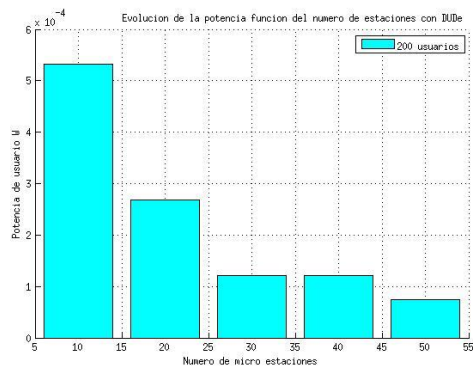
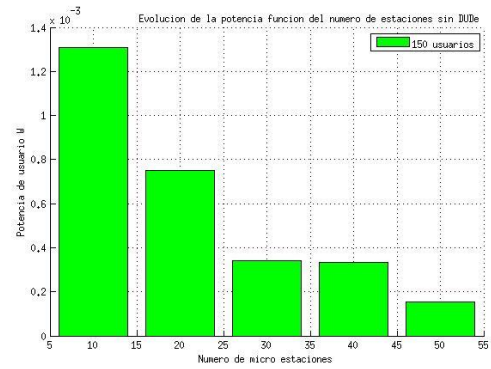
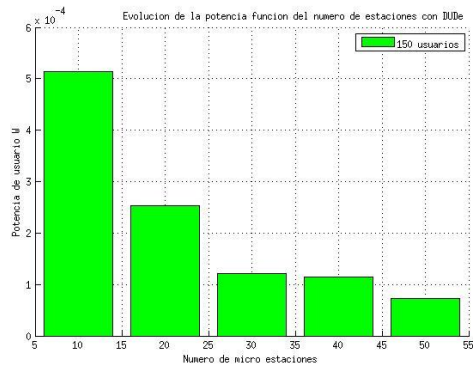
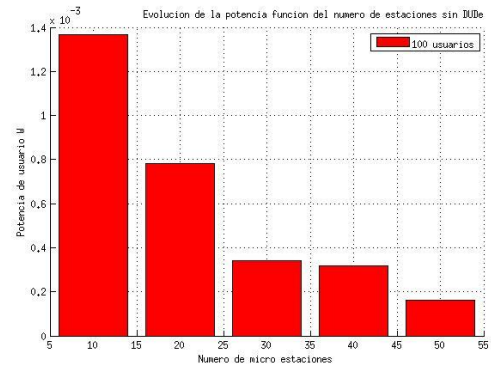
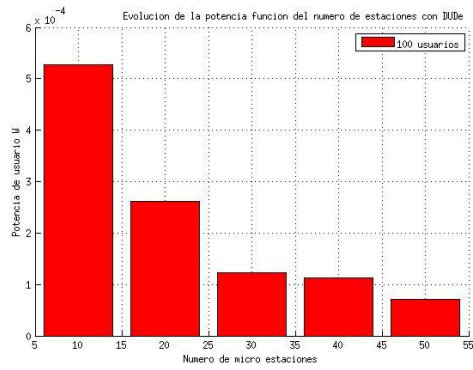
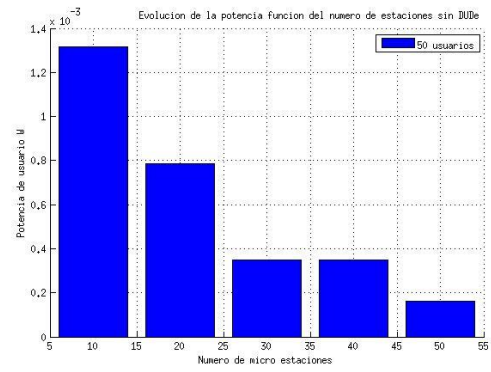
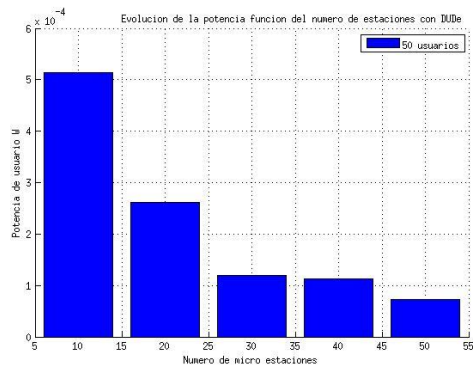


Figura 4.33. Comparación del número de Resource Blocks entre usuarios en función del número de estaciones.



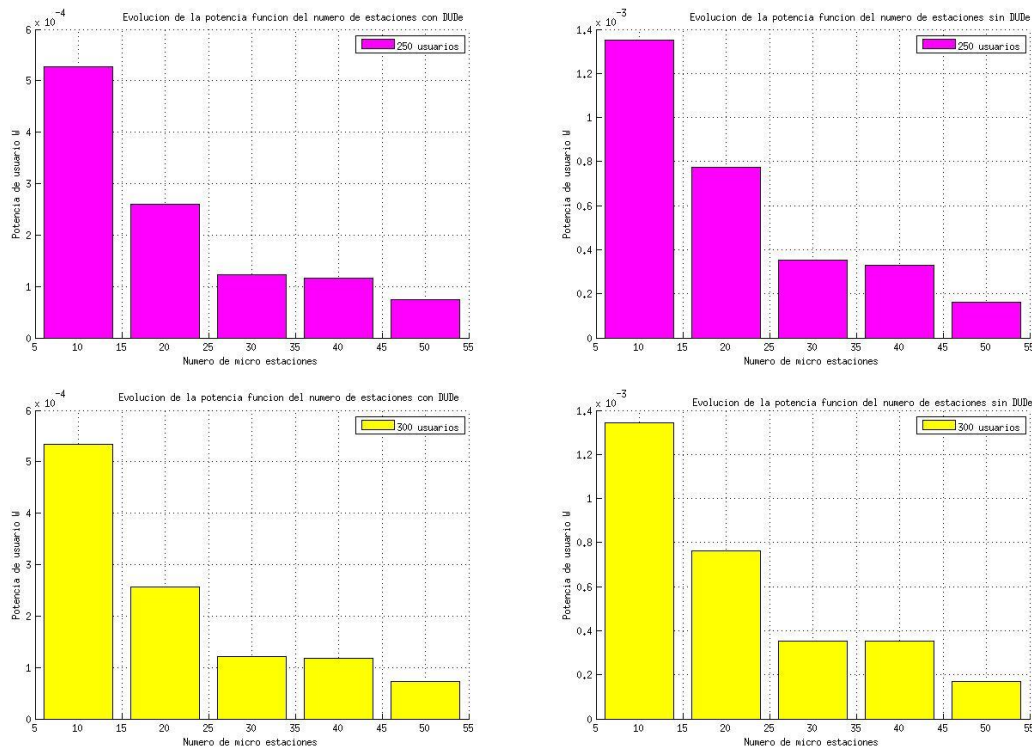


Figura 4.34. Evolución de la potencia emitida por usuario en función del número de estaciones, con y sin DUDe, 50, 100,150, 200,250 y 300 usuarios.

Por último, para terminar con los parámetros clave, en la Figura 4.34 se indican las potencias emitidas por los usuarios, que seguirán la misma tendencia de los anteriores; se aprecia que la reducción entre 30 y 40 estaciones será prácticamente inexistente, mientras que de 10 a 20 será de casi la mitad. Además, al utilizar DUDe, se ahorra prácticamente el doble de energía en comparación con LTE tradicional, pudiendo incrementar notablemente la duración de la batería de los terminales, independientemente del número de estaciones empleadas, a diferencia de los parámetros anteriores, cuya diferencia se reducida al incrementar el número de estaciones base, tal y como se aprecia en la figura 4.35.

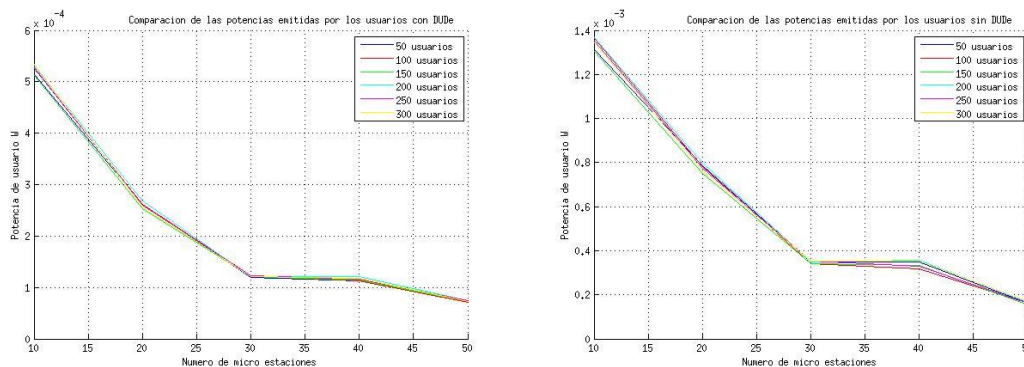


Figura 4.35. Comparación de la potencia emitida por los usuarios en función del número de estaciones

En cuanto al balanceo de carga, este sí que se verá influenciado por el número de usuarios, aunque no se llega a saturar ninguna estación, tal y como se ha indicado, sí que se aprecia una gran diferencia en el reparto y las cargas empleadas en función de ellos. Únicamente se muestran los resultados para 100 usuarios, y para 10,30 y 50 estaciones.

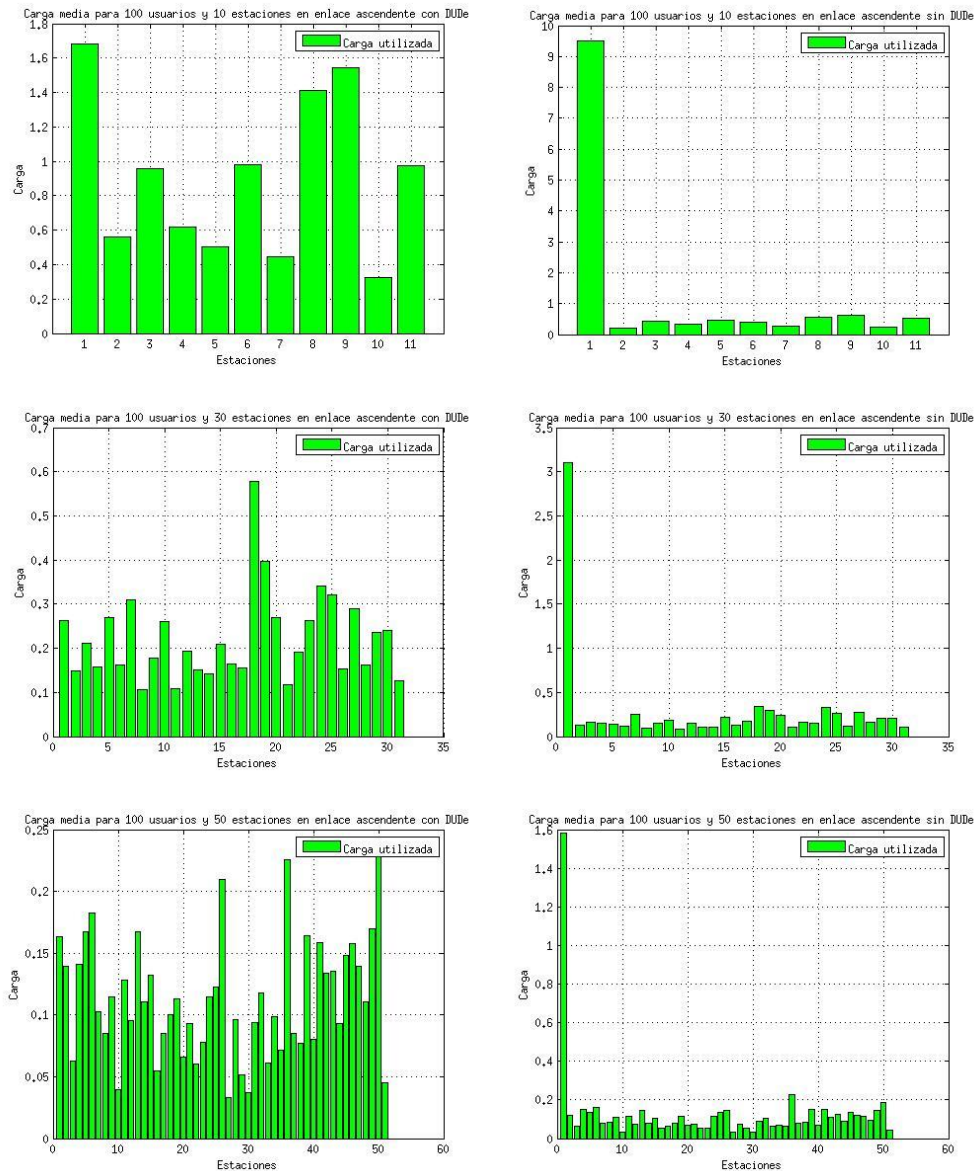


Figura 4.36. Carga media por estación para 100 usuarios; 10 20 y 30 micro estaciones.

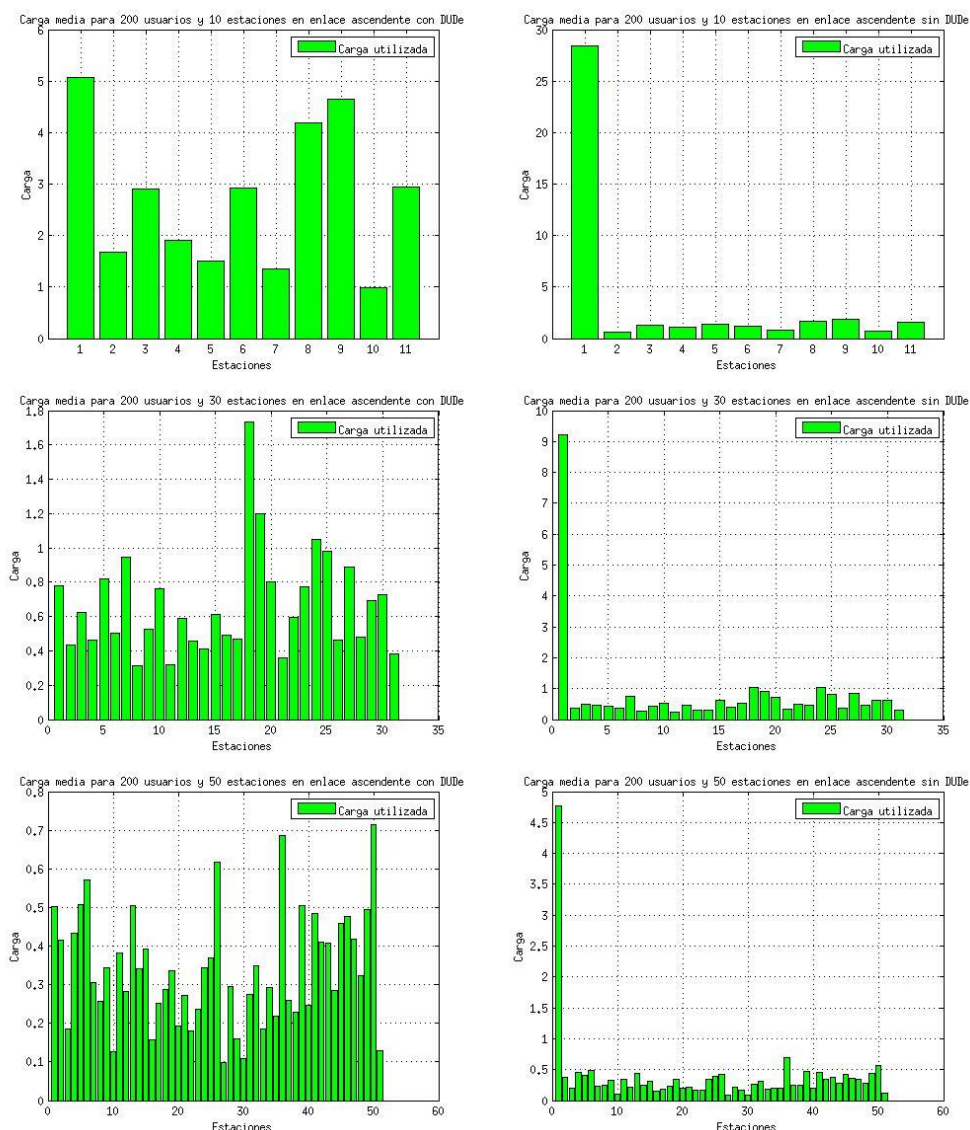


Figura 4.37. Carga media por estación para 200 usuarios; 10 20 y 30 micro estaciones.

Como se observa en las Figuras 4.36 y 4.37, un incremento de usuarios aumenta en gran medida las cargas de las estaciones, debido al aumento de tráfico. Este aumento, al utilizar DUDe, no pondría en peligro la estabilidad de la red, pues el reparto entre las estaciones es evidente y ninguna está muy cargada, por tanto, una red con esta técnica implementada podría aceptar a un número de usuarios notablemente mayor. Sin embargo, en LTE tradicional se puede apreciar un uso excesivo de la estación macro, necesitando implementar muchas micro estaciones para suavizar su carga, con el coste que ello conlleva.

Por tanto, no solo necesitan menos Resource Blocks para transmitir, sino que el reparto se realiza de una manera mucho más optimizada, pudiendo dar servicio a un mayor número de usuarios, y ahorrar en costes, pues no es necesario disponer de tantas estaciones micro ya que pueden repartirse las cargas sin saturarse.



Por último, los servicios cursados también dependerán del número de usuarios. Primeramente se indicará el número de servicios de cada tipo en la Figura 4.38, observando cómo aumentan los servicios activos en función de los usuarios que participan, además de que, al desplegar más estaciones, también será posible mantener un mayor número simultáneamente, pues se rechazarían muchos menos, por condiciones tales como estar fuera de cobertura.

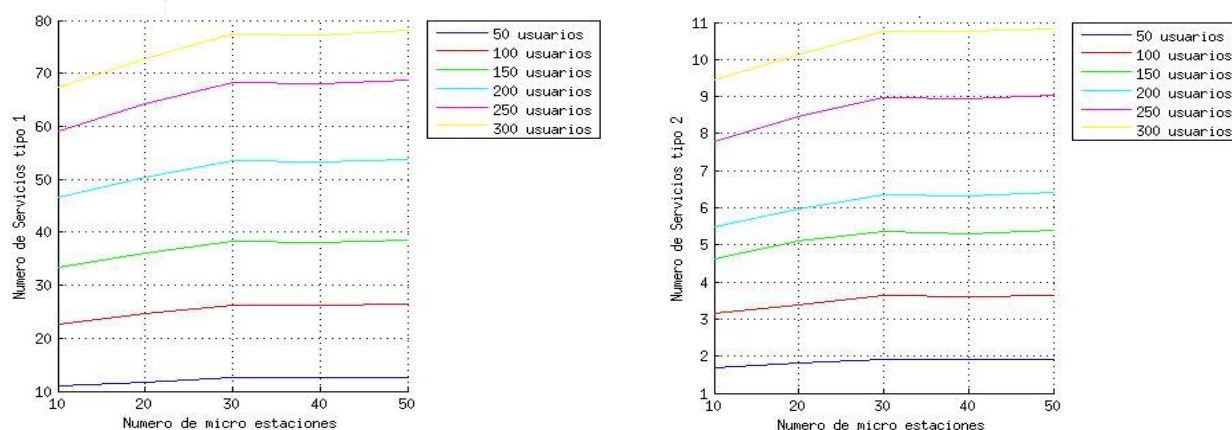


Figura 4.38. Número de servicios activos de tipo 1 y 2.

La Figura 4.39 pone de manifiesto que estos servicios perdidos se reducen al incrementar los cursados indicados en la Figura 4.38. Como se vio anteriormente, una vez que se despliegan 30 estaciones, las condiciones de la red mejoran notablemente, y apenas aparecen servicios perdidos.

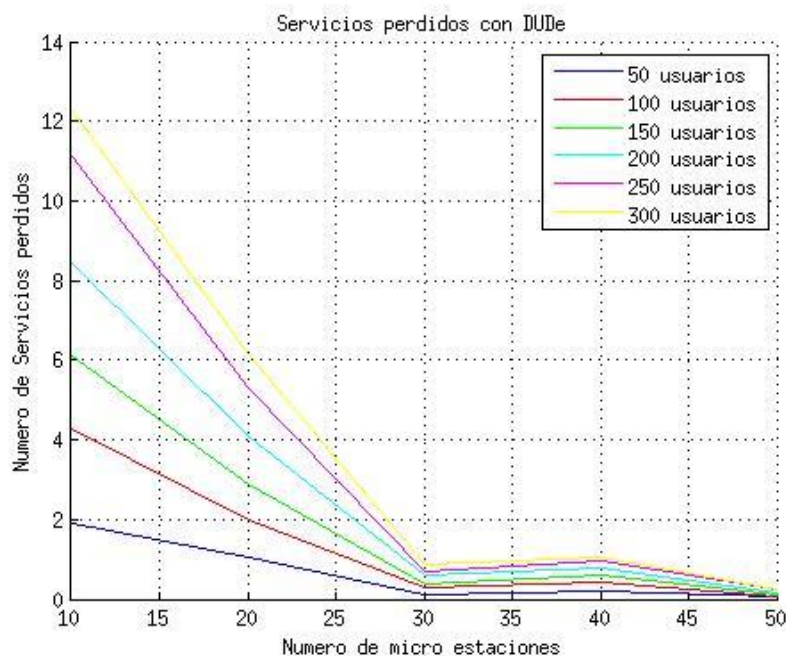


Figura 4.39. Número de servicios perdidos.

Para concluir este capítulo, en la Figura 4.39 se mostrará cuáles de los servicios indicados anteriormente están activos en macro o micro células. Se ve nuevamente la capacidad de DUDe de repartir la carga, favoreciendo la

utilización de las micro. Este reparto será mucho más diferenciado cuando hay un número reducido de estaciones, lo cual queda claro observando la pendiente de las gráficas, que es mucho más pronunciada.

LTE tradicional incrementa mucho el uso de las micro estaciones al desplegar un gran número de ellas, mientras que DUDe se mantiene mucho más constante, permitiendo estabilizar el comportamiento de la red, que tendría una mayor tolerancia a fallos.

Esto queda de manifiesto porque si en DUDe fallara una estación sería muy sencillo reconectarse a otra, pues estarían en su mayoría disponibles; además como los servicios se encontrarían muy repartidos, no se perdería un gran número de ellos. Mientras que en LTE, si falla la estación macro la mayoría de las conexiones serían rechazadas.

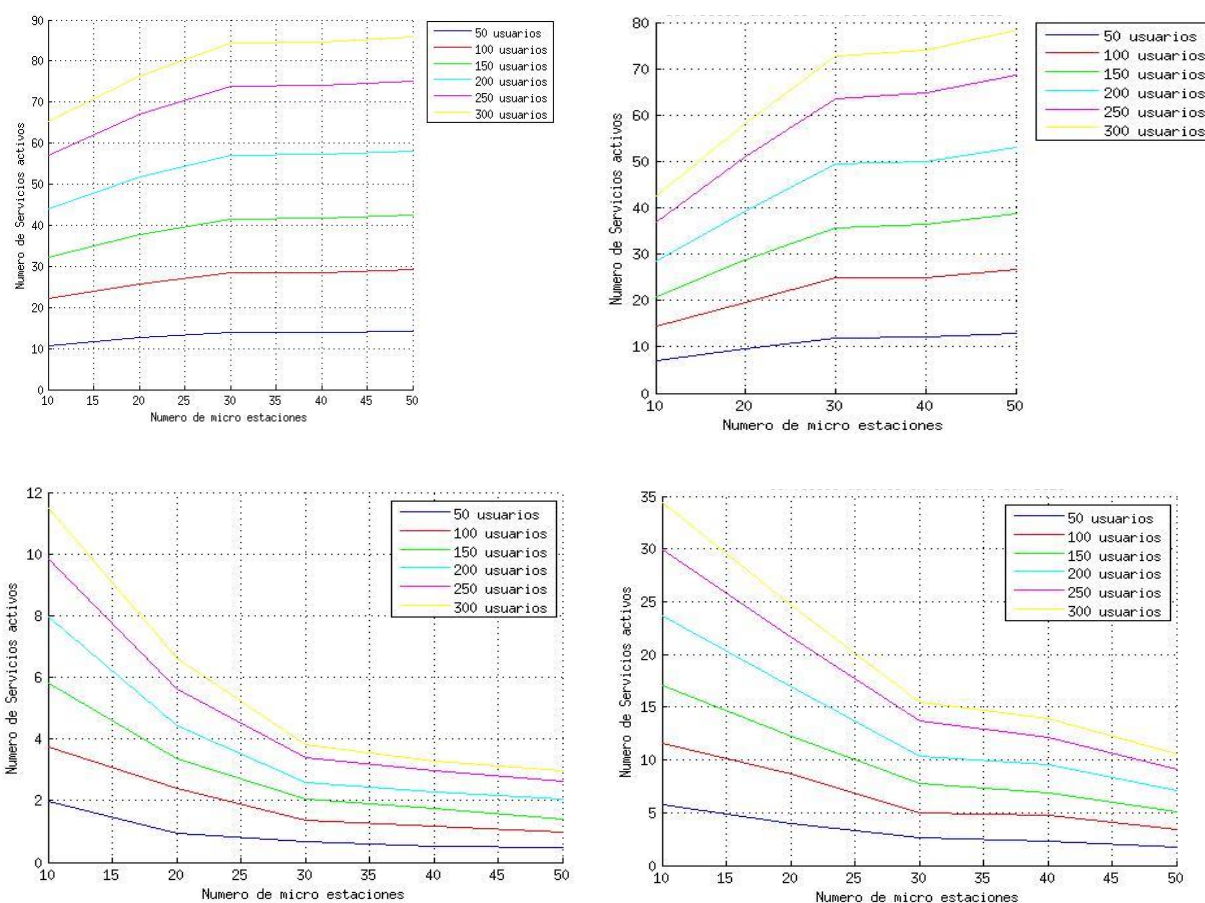


Figura 4.40. Servicios activos en la macro y micro estaciones, con y sin DUDe.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

### **5.1 Conclusión del proyecto**

Tras la realización de este trabajo se ha adquirido una visión mucho más precisa de la tecnología LTE, entendiendo su potencial y la larga evolución de las tecnologías digitales móviles hasta su aparición. Se ha visto además que es posible aplicar diferentes técnicas para mejorar su funcionamiento, y se ha hecho un análisis de DUDe.

Además, se han podido obtener numerosos resultados mediante los despliegues realizados, para lo que se ha hecho uso de una herramienta propietaria ad-hoc que se ha mejorado, dotándola de los módulos necesarios para estudiar las técnicas DUDe. Los resultados obtenidos ilustran las diferentes opciones que DUDe puede aportar a una red LTE, para mejorar su rendimiento y capacidad.

Estos siempre han ido acompañados de los que se obtendrían en una red LTE tradicional, observando la mejoría conseguida en los parámetros clave, la influencia que el número de estaciones tiene en la misma, y poniendo de manifiesto que el número de usuarios y de servicios activos también han jugado un papel clave a la hora de observar el balance de carga, dejando de infrautilizar estaciones micro y proporcionando más alternativas a la hora de conectarse. También se ha observado la tendencia del reparto de los servicios activos, y las diferentes causas por las que los mismos pueden llegar a perderse, observando su distribución en las estaciones.

Se ha visto que al aumentar las estaciones por encima de cierto número, la influencia de DUDe empieza a dejar de ser tan importante. Se puede concluir que es posible reducir coste en el despliegue de estaciones si se emplea DUDe, pues es barato de implementar y obtiene unos rendimientos similares a LTE tradicional con mayor número de estaciones. También se ha destacado la estabilidad que proporciona DUDe en cuanto al reparto de conexiones, y la fiabilidad que así proporciona a la red, haciéndola más resistente a fallos.

Por último, se argumenta que el número de recursos necesarios para establecer servicios disminuye de manera relevante, permitiendo cargar menos las estaciones en el enlace ascendente, incrementando la capacidad de la red, que además está menos sobrecargada, reduciendo la pérdida de servicios.



## **5.2 Líneas futuras**

Una vez en este punto, es posible indicar alguna de las posibles líneas futuras de investigación que se podrán realizar a partir del trabajo desarrollado.

- El estudio de la influencia de DUDe en redes saturadas, planteando soluciones que no se limiten simplemente a incrementar el número de estaciones.
- Complementar el análisis con simulaciones más realistas, teniendo en cuenta todos los factores que aparecen en las comunicaciones, algunos de los cuales se han simplificado en este trabajo.
- Realizar un estudio económico, para poder comparar el ahorro/gasto realizado con las mejoras que DUDe implementa, viendo si aportan beneficios a los operadores.
- Observar si a partir de cierto número de estaciones base compensa introducir DUDe, o comprobar mediante técnicas de optimización el número de estaciones que sería posible ahorrarse al emplear esta técnica.

# **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", E. Dahlman, S. Parkvall. J. Sköld.
- [2] "Esentials of LTE and LTE-A, Cambridge wireless essentials series", A. Ghosh, R. Ratasuk.
- [3] "Arquitectura general del sistema LTE", Carlos Alberto Serra Jimenez, Francisco Reinerio Marante Rizo.
- [4] "4G: functionalities development and an Analysis of mobile wireless grid", Jivesh Govil, Jivika govil, Cisco systems inc. USA.
- [5] "Why to Decouple the Uplink and Downlink in Cellular Networks and How To Do It", Federico Boccardi, Jeffrey Andrews, Hisham Elshaer, Mischa Dohler, Stefan Parkvall, Petar Popovski, Sarabjot Singh.
- [6] "4G, Estado del Arte", Carlos Manosalva Uhart, Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [7] "Performance of Uplink Fractional Power Control in UTRAN LTE", Carlos Ubeda Castellanos, Dimas Lopez Villa, Claudio Rosa, Klaus I. Pedersen, Francesco D. Calabrese, Per-Henrik Michaelsen and Jurgen Michel.
- [8] "Picocell positioning in an LTE network", Pedro Serra, Antonio Rodrigues.
- [9] "UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)", China Mobile Communications Corporation, KPN Mobile NV, NTT DoCoMo Inc., Orange SA, Sprint Nextel Corporation, T-Mobile International AG & Co KG and, Vodafone Group PLC.
- [10] "LTE, for 3GPP", Magdalena Nohrborg.
- [11] "Downlink and Uplink User Association in Dense Next-Generation Wireless Networks", Nikhil Garg.
- [12] "LTE key features", Aptica y Xirio.
- [13] "Sistemas de comunicaciones móviles de la tercera a la cuarta generación", 3GPP y 3GAmerica.
- [14] "Evolución de los sistemas móviles: GSM al LTE", Emma Guerra.
- [15] "Conexiones GSM, GPRS, 3G, UMTS, HSPDA, 3G+", Carlos Sandoca.
- [16] "1G, 2G, GSM, 3G, EDGE, HPSA, 4G y LTE: La evolución de las conexiones móviles"

- [17] "Evolución de los sistemas móviles celulares GSM", Álvaro Pachón de la Cruz, Departamento Redes y Comunicaciones Universidad Icesi-I2T.
- [18] "Todo sobre LTE y 4G: que es y para qué sirve", Nicolas Rivera, Omnicrono.
- [19] "LTE MIMO: Multiple Input Multiple Output" , Ian Poole, Radio-Electronics.
- [20] "Propagation models for LTE", Grupo Ingenieria Telematica, Universidad de Cantabria.
- [21] "Redes móviles terrestres: 4G", F. Pérez, Escuela Técnica Superior de Ingeniería-ICAI. Universidad Pontificia Comillas.