

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS  
DEVICE-TO-DEVICE EN LA GESTIÓN DE  
RECURSOS RADIO EN REDES LTE PARA  
MINIMIZAR LA EXPOSICIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA**

Para acceder al Título de

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

Autor: Paula Sarasúa Zubimendi

Octubre-2015

# Resumen

A lo largo de los últimos años se ha producido una gran evolución de las redes de comunicación; esto, unido al aumento de la densidad de nodos y al crecimiento exponencial del tráfico cursado en las redes, ha ocasionado que se produzcan situaciones de congestión y de retardos muy elevados. Para tratar de solventar estas limitaciones, el Third Generation Partnership Project (3GPP), ha propuesto nuevas soluciones en el acceso para las redes 4G, siendo un ejemplo de las mismas las técnicas Device-to-device (D2D). Con ellas se trataría de aumentar la capacidad de las redes de comunicación, en concreto incrementar la eficiencia, un ahorro energético y una mejora de la calidad de servicio, además de la posibilidad de cursar servicios en proximidad, sin necesidad de mantener la conexión con la estación base.

Este trabajo se plantea en este escenario, para comprobar, mediante la creación de una herramienta de simulación de acceso de redes 4G, los beneficios que estas técnicas pueden proporcionar. Una vez validada la herramienta, será necesario dotarla de cierta inteligencia para que seleccione el método de conexión más beneficioso en términos de potencia, según la situación en que se encuentren los usuarios.

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

# Abstract

During the latest years, communication networks have undertaken a huge evolution, which, together with an increasing node density and traffic, have caused the appearance of certain limitations, like long delays and congestion situations. In order to solve these issues and to enhance the system capacity, the 3GPP proposes new access solutions for 4G networks, such as D2D. 3GPP argues that D2D will bring a higher efficiency, energy savings, a better quality of service and the possibility of using proximity services, without a direct link with the base station.

The main goal of this project is therefore to verify the enhancements brought by this type of techniques by means of a C++ proprietary 4G access network simulator. Once the correct behaviour of such tool is assessed certain intelligence was added to dynamically select the best connection alternative in terms of power consumption, depending on users' circumstances.

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

# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>5</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>7</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>9</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>10</b>
<b>2 Conceptos teóricos</b>	<b>12</b>
2.1. LTE . . . . .	12
2.1.1. Modelos de propagación . . . . .	14
2.1.2. Tecnología subyacente en la capa física . . . . .	16
2.2. D2D . . . . .	20
2.2.1. ¿Qué es el device-to-device? . . . . .	20
2.2.2. Trabajo relacionado . . . . .	22
2.2.3. Tecnología que subyace . . . . .	22
2.2.4. Escenarios de uso . . . . .	24
2.2.5. Ventajas e incentivos . . . . .	25
<b>3 Herramienta</b>	<b>28</b>
3.1. Core de la herramienta . . . . .	28
3.2. Trazas, archivos de configuración y escenarios . . . . .	32
3.3. Módulos adheridos . . . . .	34
3.3.1. Directamente LTE . . . . .	34
3.3.2. Aplicación de técnicas D2D . . . . .	37
<b>4 Resultados</b>	<b>40</b>
4.1. Fase 1: Escenario de prueba . . . . .	40
4.2. Fase 2: Escenario Fijo . . . . .	45
4.2.1. Descripción del escenario . . . . .	45
4.2.2. Métricas . . . . .	47
<b>5 Conclusiones</b>	<b>64</b>
<b>Anexos</b>	<b>67</b>
<b>A Resultados evitando traspasos</b>	<b>68</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>

# Índice de figuras

2.1. Ortogonalidad de las sub-portadoras en el dominio frecuencial . . . . .	17
2.2. Esquema de los recursos en LTE. . . . .	19
2.3. Esquema OFDMA y SC-FDMA. . . . .	20
2.4. Dos posibles conexiones a la red . . . . .	21
2.5. Casos en los que usamos diferentes tipos de D2D[1] . . . . .	22
2.6. Escenario planteado en la ciudad de Elche[4] . . . . .	23
2.7. Esquema de overlay inband, underlay inband and outband . . . . .	23
3.1. Máquina de estados en los que se puede encontrar un servicio . . . . .	31
3.2. Funcionamiento de la herramienta . . . . .	33
3.3. Acciones realizadas en la simulación . . . . .	34
4.1. Despliegue simulado (izquierda) y escenario emulado (derecha) . . . . .	41
4.2. Resultados para tasa bruta 6Mb . . . . .	41
4.3. Resultados para tasa bruta 9Mb . . . . .	42
4.4. Resultados para tasa bruta 12Mb . . . . .	42
4.5. Resultados para tasa bruta 18b . . . . .	42
4.6. Resultados para tasa bruta 24Mb . . . . .	43
4.7. Resultados para tasa bruta 36Mb . . . . .	43
4.8. Resultados para tasa bruta 48Mb . . . . .	43
4.9. Resultados para tasa bruta 54Mb . . . . .	44
4.10. Comportamiento de los servicios . . . . .	49
4.11. Tiempo para el servicio 1 . . . . .	50
4.12. Tiempo para el servicio 2 . . . . .	50
4.13. Potencia media consumida por los usuarios para $PTx=6dB$ . . . . .	51
4.14. Potencia media consumida por los usuarios para $PTx=11dB$ . . . . .	51
4.15. Potencia media consumida por los usuarios para $PTx=16dB$ . . . . .	51
4.16. Tráfico cursado para potencia de transmisión 6dB . . . . .	52
4.17. Tráfico cursado para potencia de transmisión 11dB . . . . .	52
4.18. Tráfico cursado para potencia de transmisión 16dB . . . . .	53
4.19. Potencia media según el tráfico cursado para $PTx=6dB$ . . . . .	53
4.20. Potencia media según el tráfico cursado para $PTx=11dB$ . . . . .	54
4.21. Potencia media según el tráfico cursado para $PTx=16dB$ . . . . .	54
4.22. Resource blocks utilizados para $PTx=6dB$ . . . . .	54
4.23. Resource blocks utilizados para $PTx=11dB$ . . . . .	55
4.24. Resource blocks utilizados para $PTx=16dB$ . . . . .	55
4.25. Resource blocks / tráfico cursado . . . . .	55
4.26. Medidas en la hora cargada para $PTx=6dB$ . . . . .	57
4.27. Medidas en la hora cargada para $PTx=11dB$ . . . . .	58

4.28. Medidas en la hora cargada para $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	59
4.29. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	60
4.30. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	60
4.31. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	61
4.32. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	61
4.33. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	62
4.34. Traspasos diferenciados en servicios con $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	62
4.35. CDF del grado de ocupación de los relayers . . . . .	63
A.1. Comportamiento de los servicios . . . . .	69
A.2. Tiempo para el servicio 1 . . . . .	70
A.3. Tiempo para el servicio 2 . . . . .	70
A.4. Potencia media consumida por los usuarios para $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	70
A.5. Potencia media consumida por los usuarios para $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	71
A.6. Potencia media consumida por los usuarios para $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	71
A.7. Tráfico cursado para potencia de transmisión 6dB . . . . .	71
A.8. Tráfico cursado para potencia de transmisión 11dB . . . . .	72
A.9. Tráfico cursado para potencia de transmisión 16dB . . . . .	72
A.10. Potencia media según el tráfico cursado para $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	72
A.11. Potencia media según el tráfico cursado para $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	73
A.12. Potencia media según el tráfico cursado para $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	73
A.13. Resource blocks utilizados para $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	73
A.14. Resource blocks utilizados para $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	74
A.15. Resource blocks utilizados para $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	74
A.16. Resource blocks / trafico cursado . . . . .	74
A.17. Medidas en la hora cargada para $PT_x=6\text{dB}$ . . . . .	75
A.18. Medidas en la hora cargada para $PT_x=11\text{dB}$ . . . . .	76
A.19. Medidas en la hora cargada para $PT_x=16\text{dB}$ . . . . .	77

# Índice de tablas

2.1. Minimum Coupling Losses . . . . .	14
2.2. Modelo de propagación . . . . .	15
2.3. Probabilidad de LOS . . . . .	16
2.4. LTE carrier information[7] . . . . .	19
3.1. Mapeo de la velocidad de 802.11g . . . . .	38

# Acrónimos

**3GPP** Third Generation Partnership Project. 8, 9

**AES** Advanced Encryption Standard. 19

**ARIB** Association of Radio Industries and Businesses. 8

**ATIS** Alliance for Telecommunications Industry Solutions. 8

**BS** Base station. 9

**CCSA** China Communications Standards Association. 8

**CDF** Cumulative Distribution Function. 58

**CDMA** Code Division Multiple Access. 8, 11

**CoMP** Coordinated Multipoint. 7, 23

**CP** Cyclic Prefix. 12

**D2D** Device-to-device. 15, 18, 20–24, 27, 33, 35

**DUDe** Downlink/Uplink Decoupling. 7, 23

**e-UTRA** Evolved Universal Terrestrial Radio Access. 9, 11

**eICIC** Enhanced Inter-cell Interference Coordination. 7

**ETSI** European Telecommunications Standards Institute. 8, 9

**FDMA** Frequency Division Multiple Access. 8

**GPRS** General Packet Radio Services. 7

**GSM** Global Systems for Mobile Communications. 7, 8

**HSPA** High-Speed Packet Access. 7, 9

**IMT-2000** International Mobile Telecommunications-2000. 8

**IMT-A** International Mobile Telecommunications Advanced. 8

- ISI** Inter symbol Interference. 12
- ITU** International Telecommunications Union. 8
- LEXNET** Low EMF Exposure Networks. 20
- LOS** Line-of-sight. 9
- LTE** Long Term Evolution. 7–9, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 27, 29, 31–33, 35
- LTE-A** Long Term Evolution Advanced. 8, 9
- MBWA** Mobile Broadband Wireless Access. 8
- MCL** Minimum Coupling Losses. 9
- MIMO** Multiple-input Multiple-output. 7, 8, 11
- NLOS** Non-line-of-sight. 9
- OFDM** Orthogonal Frequency-Division Multiple. 11–14
- OFDMA** Orthogonal Frequency-Division Multiple Access. 8, 9, 11, 13, 15
- P2P** Peer-to-Peer. 19, 34
- P2P-C** Peer-to-Peer Client. 19
- P2P-GO** Peer-to-Peer Group Owner. 19
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation. 13
- QoE** Quality of Experience. 22
- QPSK** Quadrature Phase-Shift Keying. 13
- SC-FDMA** Single Carrier Frequency Division Multiple Access. 8, 9, 11, 13, 14
- SDR** Software Define Radio. 8
- SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio. 16, 20, 24, 30, 31, 35, 36
- TDMA** Time Division Multiple Access. 8
- TTA** Telecommunications Technology Association. 8
- TTC** Telecommunications Technology Committee. 8
- UE** User equipment. 9
- UMTS** Universal Mobile Telecommunications System. 7, 9
- W-CDMA** Wideband Code Division Multiple Access. 7, 9
- WiMAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access. 8
- WPA2** Wi-Fi Protected Access 2. 19
- WPS** Wi-Fi Protected Setup. 19

# Capítulo 1

## Introducción

Debido a las limitaciones que pueden encontrarse en las redes actuales de comunicación, tales como restricciones en potencia, retardos demasiado elevados debidos a la congestión de la red o la popularidad de nuevos servicios, comienzan a aparecer nuevas técnicas para complementar la tecnología predominante en un futuro cercano, Long Term Evolution (LTE), tales como D2D.

Estas técnicas surgen para hacer frente a las limitaciones de las redes actuales, y para satisfacer las nuevas necesidades de hoy en día por parte de los usuarios finales y de los operadores.

Los beneficios que supondrían disponer de estas técnicas para un usuario final serían: ahorro energético, incremento de la eficiencia o cursar nuevos servicios en proximidad, con los que se podría ahorrar la conexión con la estación base. También se obtendrían ventajas del lado de los operadores de red, como aumentar la zona de cobertura, incrementar la eficiencia del espectro o poder satisfacer la demanda de un mayor número de terminales que estén conectados al mismo tiempo en el futuro.

Por la situación anterior se ha considerado interesante realizar una simulación del comportamiento del enlace de bajada en una red LTE combinada con una de estas técnicas, para comprobar las mejoras indicadas por el 3GPP [9]. Para ello se ha implementado una herramienta mediante programación C++ con la capacidad de modelar una red de acceso en la que se disponen de tres tipos de elementos diferentes: estaciones base, usuarios y servicios.

Sobre la herramienta se realizará un despliegue de red para el estudio del comportamiento del escenario al realizar un modelo de las técnicas D2D combinadas con LTE, o aplicando directamente LTE.

Por todo esto los objetivos principales del trabajo serán:

- Creación de una herramienta de simulación de redes LTE.
- Descripción del modelo teórico de una conexión LTE y D2D.

- Proporcionar la inteligencia necesaria a ese modelo teórico para que, dependiendo de las condiciones bajo las que se encuentre un usuario, se utilice una conexión LTE o D2D.
- Aplicar todos los objetivos anteriores para obtener una reducción de la exposición electromagnética, ya que este trabajo se enmarca dentro de la investigación que el Grupo de Ingeniería Telemática ha venido llevando a cabo en el proyecto europeo LEXNET, cuyo principal objetivo es el diseño de componentes y soluciones que permitan aliviar la exposición de los usuarios a los campos electromagnéticos que producen las redes de comunicación inalámbricas.

Para dar respuesta a estos objetivos se ha dividido el trabajo en diferentes capítulos que se comentarán a continuación, siendo el primero de ellos la introducción que se plantea en estas líneas.

- Capítulo 2: Consta de un estudio previo teórico en el que se detallan los conceptos necesarios para comprender LTE y las técnicas device-to-device. En la primera parte del capítulo se describen los conceptos claves de LTE, desde las tecnologías en el acceso, el estado del arte, la descripción de sus modelos de propagación o la definición de sus recursos. En la segunda parte del capítulo se encontrarán las claves sobre las técnicas device-to-device, desde la definición del concepto, hasta el modelo teórico utilizado, dependiente de la forma de trabajo.
- Capítulo 3: Se realiza una descripción de todos los elementos que componen la herramienta utilizada para llevar a cabo el análisis en este trabajo, así como su funcionamiento para un acceso LTE normal o aplicando las técnicas device-to-device.
- Capítulo 4: Una vez que se haya implementado el comportamiento deseado en la herramienta, se procederá a obtener resultados para dos tipos de escenarios. El primero de estos, sencillo, se utiliza para comprobar que el comportamiento está siendo el adecuado, comparándolo con un modelo teórico que se ha realizado sobre Matlab. En segundo lugar, se procederá a analizar un escenario concreto, en el que van apareciendo un gran número de usuarios en un área no muy grande, obteniendo así una densidad elevada con las condiciones adecuadas para analizar los beneficios de las técnicas D2D.
- Capítulo 5: Por último se obtendrán las conclusiones de los resultados obtenidos, analizando la eficiencia de las técnicas device-to-device en los escenarios planteados frente a la utilización de conexiones directas LTE, así como las posibles líneas futuras que se pueden aplicar a este trabajo.

## Capítulo 2

# Conceptos teóricos

Es necesaria la introducción de ciertos aspectos teóricos para comprender el conjunto total del trabajo. Su principal objetivo reside en la minimización de la exposición electromagnética causada por las redes LTE, para lo que se aplicarán técnicas device-to-device para gestionar los recursos radio en estas redes.

El device-to-device es sólo una de las múltiples novedades que han aparecido en las actualizaciones recientes de la tecnología LTE. Dichas novedades se encuentran aún en periodo de estudio, sin estar cercana su implementación en las redes actuales. Entre estas nuevas tecnologías destacan: agregación de portadoras, técnicas Multiple-input Multiple-output (MIMO), Enhanced Inter-cell Interference Coordination (eICIC), técnicas Coordinated Multipoint (CoMP) o Downlink/Uplink Decoupling (DUDe). Cada una de las anteriores podría proporcionar ciertos beneficios, tanto en el lado del operador como en el de los usuarios finales, pero dada la elevada radiación electromagnética por parte de las estaciones base, parece que una aproximación adecuada pasa por la utilización de técnicas device-to-device. El resto del capítulo se estructura en los dos siguientes bloques:

- Funcionamiento básico de las redes LTE
- Esquema de funcionamiento de las técnicas device-to-device

### 2.1. LTE

En el mundo de las telecomunicaciones las tecnologías de redes móviles están divididas en lo que se ha venido a llamar generaciones. Todo parte con la primera generación, desarrollada en los 80's, en la que las comunicaciones eran analógicas. En el paso de la primera a la segunda generación es donde se realiza ese salto al mundo digital, con el lanzamiento de Global Systems for Mobile Communications (GSM), cuya principal innovación fue aumentar la capacidad de los dispositivos y permitir el intercambio de datos, a baja velocidad, y SMS. Posteriormente apareció el 2.5G, General Packet Radio Services (GPRS), que hace realidad el intercambio de paquetes de datos sobre sistemas celulares en la segunda mitad de los 90's. A continuación se despliegan las redes móviles 3G, basadas en Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) y posteriormente su actualización denominada 3.5G High-Speed Packet Access (HSPA).

Ambas fueron desarrolladas sobre el marco de requerimientos del International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) propuesto por la International Telecommunications Union (ITU). Por último mencionar que el 3GPP se forma por organismos estandarizadores de todo el mundo [Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), China Communications Standards Association (CCSA), Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), Telecommunications Technology Association (TTA) y Telecommunications Technology Committee (TTC)], para lograr un desarrollo global de los estándares de redes móviles, tales como GSM, redes 3G, LTE y Long Term Evolution Advanced (LTE-A).

En la actualidad una nueva generación de tecnologías de redes móviles (4G) [3] se encuentra en pleno desarrollo. Se trata en realidad de una colección de tecnologías y protocolos que conjuntamente permiten un máximo rendimiento en el procesamiento de información con el que se permite alcanzar velocidades en el acceso de hasta 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo.

Esta cuarta generación de redes móviles ha sido desarrollada por el 3GPP bajo el marco International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-A) de la ITU y tiene como objetivo garantizar la calidad de servicio y el cumplimiento de los requisitos para la transmisión de servicios de mensajería multimedia, video chat, TV móvil o servicios de voz y datos en cualquier momento y en cualquier lugar, utilizando la alternativa que mejor calidad proporcione a un coste mínimo. Para cumplir este objetivo es indispensable la convergencia entre las redes (cableadas e inalámbricas). Así, se ha producido un importante aumento de la velocidad de transmisión para poder adecuarse al tipo de servicio asociado a cada generación; mientras en las redes 2G los servicios a los que se accedían eran del orden de  $kbit/s$ , en las redes 3G suben hasta los  $Mbit/s$  y, en la actualidad, con 4G alcanzan los  $Gbit/s$ .

De entre todas las propuestas, Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), y 3GPP LTE-A cumplieron los requisitos establecidos por la ITU para la primera versión del IMT-A, por lo que se les concedió la designación oficial de tecnología 4G. A medida que van apareciendo releases del 3GPP, las tecnologías fundamentales que soportan las redes 4G son:

- Sistemas Multiantena (MIMO).
- Software Define Radio (SDR).
- Sistemas de acceso, ya existentes como: Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access (FDMA), Code Division Multiple Access (CDMA), 802.11(Wi-Fi), 802.16m WiMAX, 802.20 Mobile Broadband Wireless Access (MBWA), Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) y Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).
- IPv6.

Este trabajo se centra en LTE-A y las tecnologías de acceso. El estándar LTE-A surge de las necesidades de los usuarios, debido a que durante los últimos años ha crecido exponencialmente la demanda de tráfico. Por ejemplo tras el apagón de la

TV analógica en España LTE ha ocupado su banda frecuencial para lograr una mejor cobertura y cubrir así sus principales objetivos, entre los que podemos encontrar:

- Aumentar la velocidad de transmisión.
- Disminuir el retardo hasta los 10ms, 100ms en el establecimiento de una conexión.
- Aumentar la eficiencia espectral (triplicando la de HSPA).
- Permitir el acceso a los usuarios a servicios de radiodifusión (TV móvil).
- Espectro flexible con anchos de banda variables.

A continuación se tratará todo lo referente al estándar LTE-A, desde las necesidades por las que surge, la tecnología que subyace, el tratamiento de sus recursos, así como los modelos de propagación que pueden usarse para su análisis.

### 2.1.1. Modelos de propagación

En este punto de la memoria se estudiará el comportamiento del interfaz radio en las redes LTE, ya que en nuestro caso no se tratará el backhaul de la red, centrándose en el interfaz de acceso a la red. Para ello se utiliza un informe técnico presentado por el ETSI 3GPP en 2012 [5].

A partir del mismo se definirá el comportamiento de Evolved Universal Terrestrial Radio Access (e-UTRA), el nuevo estándar desarrollado para el interfaz en el aire en las redes LTE, que sustituye a las tecnologías UMTS y HSPA especificadas hasta la actualización 5 del 3GPP. e-UTRA es un sistema completamente novedoso para el interfaz radio e incompatible con W-CDMA. Utiliza OFDMA en el enlace de bajada y SC-FDMA para el de subida, tecnologías que serán explicadas en los siguientes apartados.

Es necesario explicar el comportamiento en el aire de la potencia transmitida por la estación base, hasta la recepción de la señal por los dispositivos móviles. No se detallan los modelos en el enlace de subida, pues el trabajo se centra en el enlace de bajada. También hay que estudiar el pathloss (pérdidas por propagación), teniendo en cuenta dos posibles situaciones, estar en Line-of-sight (LOS) y en Non-line-of-sight (NLOS).

### Potencia Recibida

Se detallará la expresión de la potencia recibida por los dispositivos móviles desde el elemento de acceso a la red. Para ello hay que distinguir un parámetro importante en la expresión, definido como las pérdidas por acoplamiento, Minimum Coupling Losses (MCL), y detalladas en la Tabla 2.1. Establece la mínima pérdida de señal en el peor de los casos en el enlace Base station (BS)->User equipment (UE).

Tabla 2.1: Minimum Coupling Losses

	MACRO	MICRO	PICO	FEMTO
MCL	70dB (URBAN) ; 80dB (RURAL)	53dB	45dB	-

Una vez definido el parámetro de las mínimas pérdidas por acoplamiento, la Ecuación 2.1 muestra la expresión de la potencia recibida.

$$P_r = P_t - \text{máx}(\text{pathloss} - G_t - G_r, MCL) \quad (2.1)$$

donde:

- $P_r$ : es la potencia recibida por el dispositivo.
- $P_t$ : es la potencia transmitida por la estación base.
- $G_t$ : es la ganancia de transmisión de la antena transmisora.
- $G_r$ : es la ganancia de recepción de la antena en el receptor.
- *Pathloss*: son las pérdidas por propagación, detalladas a continuación.

### Pathloss

En este apartado se describe el cálculo del pathloss que aparece en la expresión de la potencia recibida, teniendo en cuenta que la distribución de los desvanecimientos por sombra es log-normal, con una desviación estándar que indica la Tabla 2.2 para cada escenario. Nótese que estos modelos podrán ser aplicados en un rango de frecuencias de 2 – 6GHz, y para diferentes alturas de la antena.

Tabla 2.2: Modelo de propagación

ESCENARIO		PL[dB]	SHADOW FADING STD[dB]	DEFAULT VALUES
URBAN MICRO (UMi)	LOS	$PL = 22.0 \cdot \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 3$	$10m < d_1 < d'_{BP}$ ; $h_{BS} = 10m; h_{UT} = 1.5m$
		$PL = 40 \cdot \log_{10}(d_1) + 7.8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 3$	$10m < d_1 < 5000m$ ; $h_{BS}=10m;$ $h_{UT}=1.5m$
	NLOS	$PL = 36.7 \cdot \log_{10}(d) + 22.7 + 26 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < 2000m$ ; $h_{BS} = 10m; h_{UT} = 1.5m$
URBAN MACRO (UMa)	LOS	$PL = 22.0 \cdot \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < d'_{BP}$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1.5m$
		$PL = 40 \cdot \log_{10}(d_1) + 7.8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \cdot \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \cdot \log_{10}(f \cdot c)$	$\sigma = 4$	$10m < d < 5000m$ $h_{BS} = 25m,$ $h_{UT} = 1.5m$
	NLOS	$PL = 161.04 - 7.1 \cdot \log_{10}(W) + 7.5 \cdot \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \cdot \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \cdot \log_{10}(h_{BS})) \cdot (\log_{10}(d) - 3) + 20 \cdot \log_{10}(f \cdot c) - (3.2 \cdot (\log_{10}(11.75 \cdot h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma = 6$	$10m < d < 5000m$ $h = \text{avg. building height}$ $W = \text{street width}$ $h_{BS} = 25m, h_{UT} = 1.5m,$ $W = 20m, h = 20m$ <i>The applicability ranges :</i> $5m < h < 50m$ $5m < W < 50m$ $10m < h_{BS} < 150m$ $1m < h_{UT} < 10m$

Respecto a la tabla anterior se pueden destacar varios elementos:

- Del conjunto de fórmulas encontradas en el informe, sólo se destacan las referentes a macrocélulas y microcélulas para escenarios urbanos.
- La distancia ( $d$ ) viene dada en  $m$ .
- Respecto a la propagación bajo línea de vista: la distancia de ruptura es

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

donde:

- $f \cdot c$  :  $f$  es la frecuencia central en Herzios, y  $c = 3 \cdot 10^8 m/s$  es la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre.
- $h'_{BS}$  y  $h'_{UT}$  son las alturas efectivas de las antenas, obtenidas de:

$$h'_{BS} = h_{BS} - 1.0m \quad y \quad h'_{UT} = h_{UT} - 1.0m$$

- La Tabla 2.3 muestra las expresiones para establecer la probabilidad de estar en línea de visión en función de la distancia.

Tabla 2.3: Probabilidad de LOS

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

### 2.1.2. Tecnología subyacente en la capa física

A continuación se describen los recursos físicos que puede proporcionar la red, conocer cómo cuantificarlos y las tecnologías que los soportan. Para el desarrollo de esta sección se seguirá hablando del interfaz radio, e-UTRA, en particular de la tecnología que utiliza en el uplink y en el downlink, siendo esta última en la que se centra el trabajo.

El diseño de la capa física de LTE está influenciado por las máximas tasas de transmisión, la eficiencia espectral y las diferentes posibilidades de ancho de banda del canal (1.25-20MHz). Para satisfacer estos requisitos se elige en esta capa el uso de la modulación Orthogonal Frequency-Division Multiple (OFDM) como portadora de la señal, que proporciona un esquema de acceso múltiple con el uso de OFDMA y SC-FDMA. Además, LTE utiliza técnicas como MIMO que conjuntamente nos proporcionan tanto un incremento en la capacidad del canal (multiplexación espacial) como un aumento en la robustez de la señal frente a los desvanecimientos por interferencias (codificación espacial en tiempo y frecuencia). Ambas consituyen el mayor cambio respecto a los sistemas 3G, basados en CDMA.

La tecnología OFDM especifica el uso de sub-portadoras ortogonales entre ellas (Figura 2.1) en el dominio de la frecuencia, sobre un amplio ancho de banda. Éstas se corresponden, en el dominio temporal a pulsos rectangulares cuya duración es la de un tiempo de símbolo. Gracias a la citada ortogonalidad se mitiga el Inter symbol

Interference (ISI), pero la propagación en el canal es dispersiva en el tiempo, recibiendo múltiples réplicas de una señal transmitida con diferentes retardos, fruto de la multitrayectoria producida entre origen y destino. Esta dispersión en tiempo produce selectividad en frecuencia (distorsión de la señal), lo que conlleva a tener cierta interferencia entre símbolos en la sub-portadora y entre sub-portadoras. Para prevenir este comportamiento se añade un tiempo de guarda o Cyclic Prefix (CP) al comienzo de cada símbolo transmitido. Ese tiempo de guarda puede variar de unos pocos Hz a kHz, dependiendo del tipo de ambiente en el que se va a operar, teniendo en cuenta dicha dispersión en tiempo máxima estimada y las variaciones que se esperan del canal.

Un sistema OFDM consiste en un conjunto de  $N$  moduladores que generan  $N$  sub-portadoras transmitidas en paralelo. Ese número  $N$  es muy variable pudiendo ir desde valores inferiores a 100 hasta varios miles.

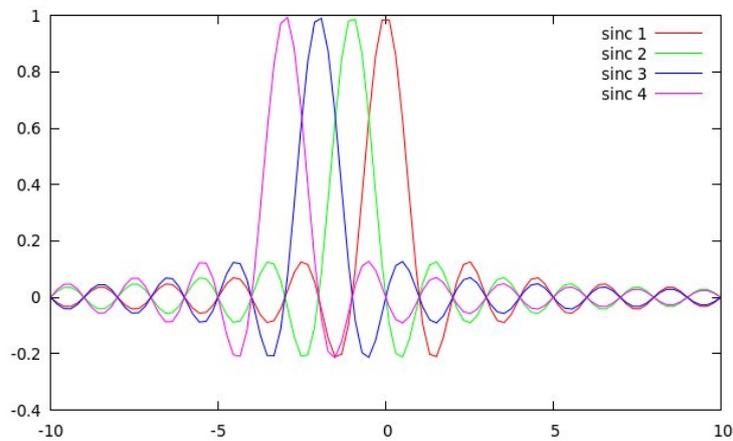


Figura 2.1: Ortogonalidad de las sub-portadoras en el dominio frecuencial

Además del uso del tiempo de guarda para limitar la interferencias, los sistemas con acceso OFDM ofrecen ventajas como:

- Eliminan la necesidad de la cancelación de la interferencia dentro de la célula.
- Proporcionan una utilización flexible del espectro.
- Aumentan la eficiencia espectral, debido a la ortogonalidad de las sub-portadoras.
- Proporcionan las mejores tasas de transmisión para cada usuario porque selecciona la mejor sub-portadora en cada caso.

Respecto a las tecnologías en el acceso serán diferenciadas, según se trate del enlace de subida (SC-FDMA) o de bajada (OFDMA), debido a sus requerimientos concretos.

### Downlink

La tecnología de acceso en el enlace de bajada es OFDMA [2], acceso múltiple por división en frecuencia ortogonal (Figura 2.3). En este caso la señal OFDM utilizada en el enlace de bajada, comprende un máximo de 2048 subportadoras. Aunque es obligatorio que los móviles puedan recibir las 2048 portadoras, no todas tienen que ser transmitidas por la estación base (sólo 72 de ellas).

Se puede elegir entre tres posibles modulaciones para la señal LTE:

- Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) : 2 bits por símbolo
- 16 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) : 4 bits por símbolo
- 64 QAM : 6 bits por símbolo

El espacio entre subportadoras ha de ser de 15kHz y para mantener la ortogonalidad la tasa de símbolo se define como  $1/15kHz = 66.7\mu s$ , por lo que cada subportadora es capaz de transportar datos a una tasa máxima de 15ksps. Por lo que para un ancho de banda total del sistema de 20MHz se genera una tasa de símbolo bruta de 18Msps, que logra una modulación 64 QAM (seis bits por símbolo), generando una tasa bruta de 108Mbps. Además, la duración de la trama es de 10ms, dividida en 20 slots de 0.5ms cada uno.

Aunque existan tres modulaciones la más extendida es la 64 QAM, ya que aunque incurra una mayor tasa de error de bit, aporta una mejora de eficiencia espectral considerable respecto a las otras dos modulaciones, lo que proporciona velocidades de transmisión de datos mucho más altas. En la modulación QAM se utilizan dos portadoras en la misma frecuencia, desplazadas  $90^\circ$  que están moduladas en dos flujos (en fase y en cuadratura). Es necesario apuntar que si la relación señal a ruido no es lo suficientemente alta, la tasa de error aumentará debiendo seleccionar una modulación más robusta.

La Figura 2.2 representa gráficamente la división de las sub-portadoras en recursos físicos en una transmisión OFDM, con una malla en tiempo-frecuencia, donde cada columna representa a un símbolo OFDM y cada fila a una subportadora OFDM. Cada una de las sub-portadoras está dividida en physical resource elements, pero no se trabajará con ellos, sino con los physical resource blocks, agrupaciones de resource elements. En concreto, un resource block (unidad mínima que se proporciona a un usuario) se corresponde con 12 sub-portadoras durante un slot temporal (0.5ms), formado por 7 símbolos. Así, para cada uno de los anchos de banda de señal diferentes necesitan un número distinto de recursos a ofrecer a los usuarios. A continuación se presenta una tabla en la que quedan reflejados los diferentes parámetros mencionados con anterioridad y para cada uno de los anchos de banda de señal (Tabla 2.4).

Cada resource block consta de 12 subportadoras de 15 kHz cada una, con un ancho de banda total de:  $12 \cdot 15k = 180kHz$ . Además hay que tener en cuenta que el espectro de 20 MHz tiene un rendimiento del 90%<sup>1</sup>, con lo que los 20 MHz de señal, pasan

<sup>1</sup>El rendimiento del espectro no es del 100% debido a la existencia de señales de control y símbolos de referencia que proporcionan información del estado del canal y consumen varios resource elements.

a ser  $20 \cdot 0.9 = 18\text{MHz}$ . Como cada resource block ocupa  $180\text{kHz}$ , se ve que hay un total de:  $18\text{MHz}/180\text{kHz} = 100$  resource blocks.

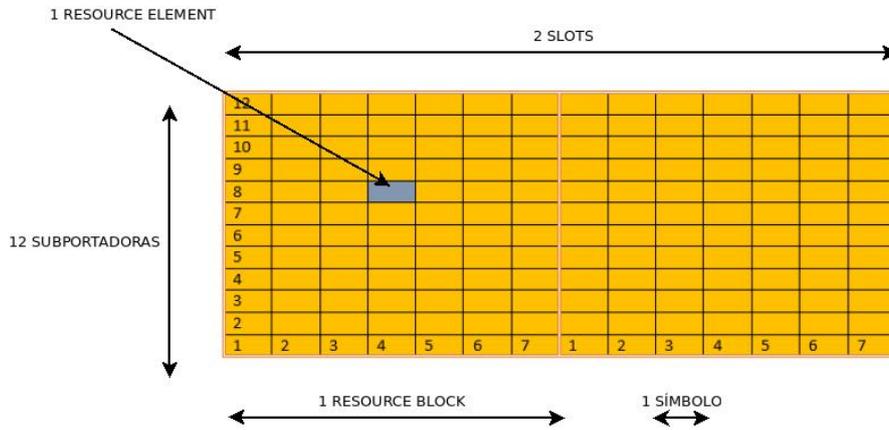


Figura 2.2: Esquema de los recursos en LTE.

Tabla 2.4: LTE carrier information[7]

Channel Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Frame Duration (ms)	10					
Subframe Duration (ms)	1					
Sub-carrier Spacing (kHz)	15					
Sampling Frequency (Mhz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
Occupied Sub-carriers (including DC sub-carrier)	76	151	301	601	901	1201
Guard Sub-carriers	52	105	211	423	635	847
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Occupied Channel Bandwidth (MHz)	1140	2265	4515	9015	13515	18015
DL Bandwidth Efficiency	77.1%	90%	90%	90%	90%	90%
OFDM Symbols/Subframe	7/6(short/long CP)					
CP Length (Short CP) ( $\mu s$ )	5.2(first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
CP Length (Long CP) ( $\mu s$ )	16.67					

### Uplink

Como en este trabajo no se analiza el enlace de subida únicamente se describe brevemente. Se utiliza como técnica de acceso SC-FDMA [7], acceso múltiple por división en frecuencia de portadora única (Figura 2.3), que comparte las características de OFDM.

Permite el acceso de múltiples usuarios al recurso de comunicación compartido, en el que se utiliza modulación de portadora única, multiplexación frecuencial ortogonal y equalización en el dominio de la frecuencia. Los símbolos utilizan todo el

ancho de banda, pero la duración de cada uno representa sólo una parte del tiempo total. El número de intervalos temporales que habrá dependerá de la modulación digital empleada. La interferencia entre símbolos podría ser alta por la modulación con portadora única, por lo que es indispensable la existencia de un ecualizador de bloque de baja complejidad en el receptor de la estación base para eliminar la dispersión temporal.

Debido a que una de las cuestiones más importantes a tener en cuenta en un dispositivo móvil es la duración de la batería parece poco adecuada la utilización de OFDMA en el enlace de subida, ya que el amplificador de potencia que transmite la señal a través de la antena hacia la estación base es el elemento que más energía consume dentro del dispositivo, y la tecnología OFDMA requiere de un elevado gasto de energía.

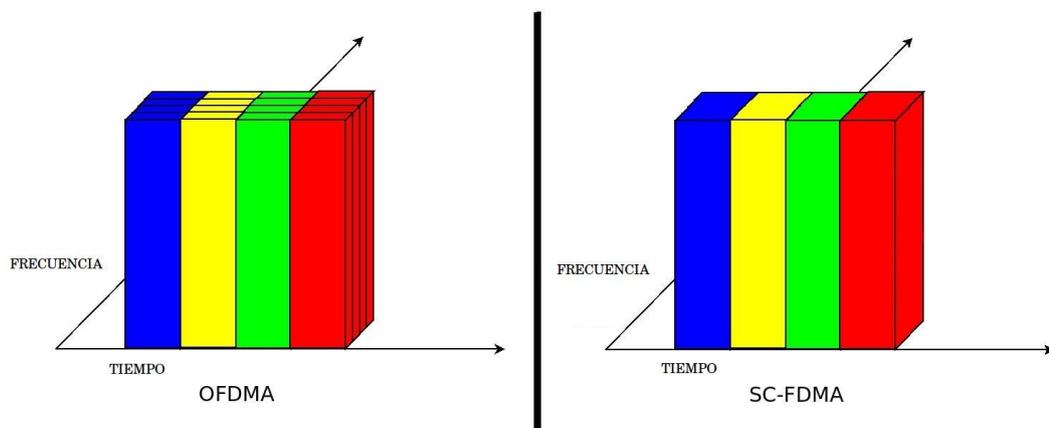


Figura 2.3: Esquema OFDMA y SC-FDMA.

## 2.2. D2D

Se describirá el funcionamiento de las técnicas device-to-device, los escenarios propicios para su uso y la tecnología subyacente en la comunicación entre los dispositivos móviles, así como los incentivos y ventajas que los operadores pueden proporcionar a sus clientes si activan el modo D2D en sus dispositivos.

### 2.2.1. ¿Qué es el device-to-device?

La Figura 2.4 ilustra cuál es la diferencia entre aplicar las técnicas device-to-device o utilizar directamente los recursos LTE. En la mitad izquierda de la misma se ve el funcionamiento normal de una estación base que proporciona un flujo (sentido de bajada) a dos dispositivos móviles directamente. En cambio, en la mitad derecha de la imagen se observa que uno de los dispositivos móviles recibe el flujo de la estación base a través del otro dispositivo, que actúa por tanto, como punto de acceso para el terminal móvil que no recibe flujo directo, a través de una comunicación device-to-device.

Para que la comunicación sea posible es necesario que el dispositivo que puede actuar como punto de acceso reenviando información tenga una conexión previa con el segundo dispositivo, en la que éste indica las aplicaciones y servicios a los que va a acceder y el volumen de la transferencia. Se puede así reservar los recursos para sus propios servicios y para los de su cliente. En una comunicación tradicional cada uno sólo se preocupaba de sus propias necesidades.

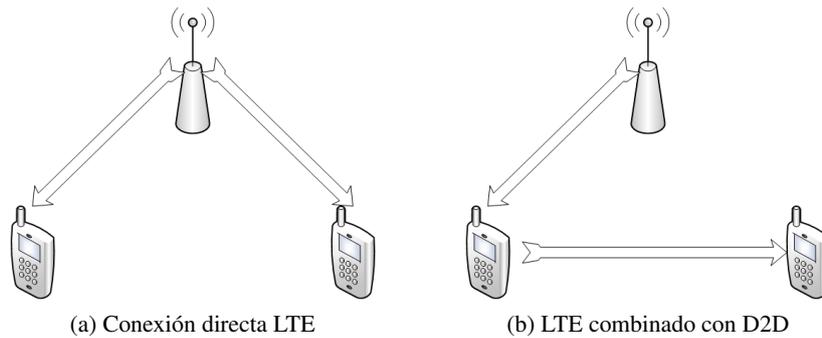


Figura 2.4: Dos posibles conexiones a la red

A continuación se presentan las dos ecuaciones para el cálculo de la potencia transmitida en las dos situaciones anteriores: Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3

$$\text{Potencia total transmitida} = \frac{P_{bs} \cdot NR_{Bu1}}{NTRB} + \frac{P_{bs} \cdot NR_{Bu2}}{NTRB} \quad (2.2)$$

$$\text{Potencia total transmitida} = \frac{P_{bs} \cdot (NR_{Bu1} + NR_{Bu2})}{NTRB} + \text{Potencia D2D} \quad (2.3)$$

Podría parecer que siempre será mayor la potencia total transmitida en el segundo caso, porque a simple vista los dos sumandos de la primera ecuación se corresponden con el primer término de la segunda, que tiene un factor adicional. No es así porque el número de recursos LTE que se le dan a cada usuario depende de las condiciones de Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) del enlace correspondiente. Así, en el primer caso, cada uno de los usuarios hace la petición de sus propios recursos (bajo sus condiciones de SINR), mientras que en el segundo caso es el usuario que hace el reenvío de los datos el que pide recursos para ambos (la condición de SINR la da este nodo), y además hay que añadir la potencia necesaria para transmitir a su cliente.

Ésta es sólo la primera de las opciones de device-to-device, y la única que se analizará en este trabajo. Existen otras posibles técnicas device-to-device, como las que se observan en la Figura 2.5.

En las redes tradicionales es obligatorio que toda comunicación vaya a través de la estación base, debido al tipo de servicios que se suelen ofrecer: llamadas de teléfono, mensajes de texto o e-Mails, que requieren bajas tasas de transmisión. Sin embargo en las redes celulares de hoy en día, es frecuente que se utilicen servicios que requieren elevadas tasas, como los juegos on-line en los que la conexión directa con la BS

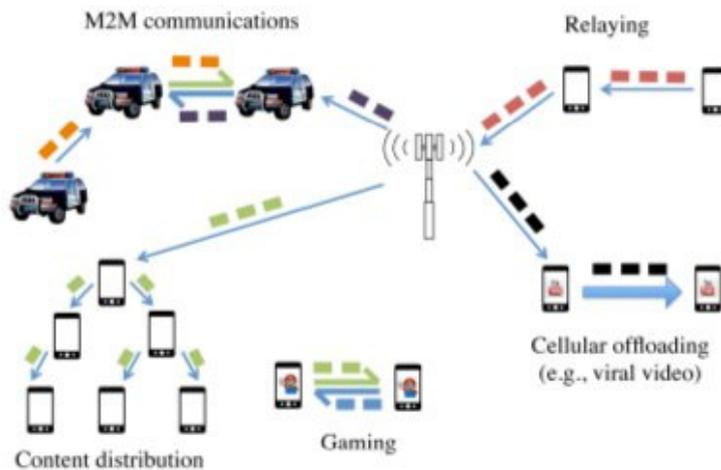


Figura 2.5: Casos en los que usamos diferentes tipos de D2D[1]

es innecesaria. Por tanto, dependiendo del servicio a utilizar se podrán implementar técnicas D2D que tengan o no comunicación con la estación base.

Como ya se ha dicho se ha decidido explorar únicamente la opción en la que sí existe una conexión con la estación base. Se obtienen numerosas ventajas con la implementación de estas técnicas D2D tales como: incremento de la eficiencia espectral, alcanzando altas tasas de transmisión en la red, reducción del retardo, y descenso de la exposición a la emisión electromagnética.

### 2.2.2. Trabajo relacionado

La primera evaluación experimental realizada en este campo fue evaluando el comportamiento con relays fijos en [12]. Posteriormente aparecieron investigaciones en las que se prestaba atención al posible potencial de relays móviles. En [6] plantean que las mejoras que se pueden proporcionar van desde extender la cobertura radio, hasta mejorar el consumo energético, pasando por mejorar la calidad de servicio, reduciendo el número de retransmisiones. En España se han hecho pruebas con esta tecnología en la ciudad de Elche, sobre un escenario como el que se observa en la Figura 2.6 [4], en el que se ha establecido que el nodo que hace el relaying sea estático, conectándose a los diferentes dispositivos móviles en condiciones de LOS y NLOS, para realizar el estudio del comportamiento de éstos. En este momento no se explicarán los costes que le puede suponer a un usuario si enciende el modo device-to-device de sus dispositivos, ya que se detallarán posteriormente.

### 2.2.3. Tecnología que subyace

Como el D2D todavía es una tecnología en estudio y no se espera su inmediata implantación en las redes LTE, no se ha definido una única tecnología para la conexión entre los nodo relay y cliente. Hay tres opciones de trabajo del D2D [1], recogidas en la Figura 2.7:

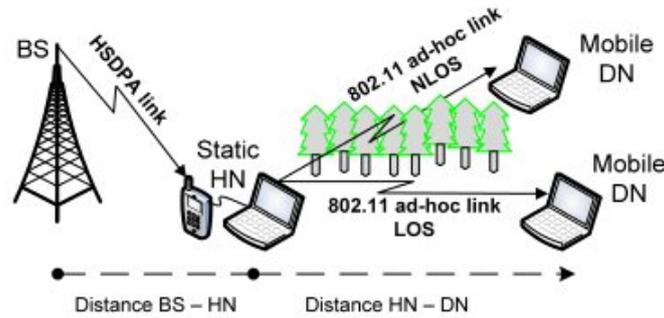


Figura 2.6: Escenario planteado en la ciudad de Elche[4]

- Underlay inband D2D: en la que las comunicaciones D2D comparten el espectro con las comunicaciones de las redes LTE.
- Overlay inband D2D: en la que los recursos de las redes celulares están repartidos para la conexión directa y para la D2D.
- Outband D2D: en la que se usa un segundo interfaz radio.

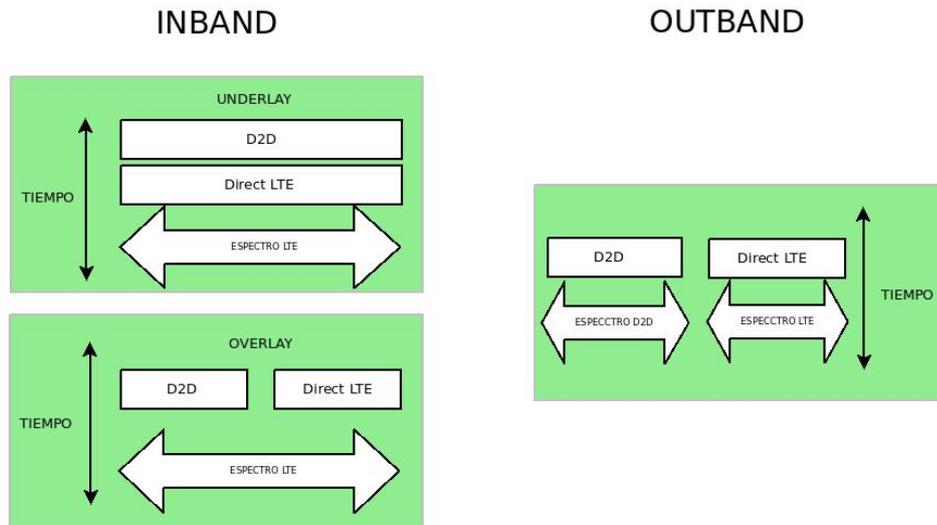


Figura 2.7: Esquema de overlay inband, underlay inband and outband

En nuestro caso se hará uso de la tercera de las opciones, pudiendo así usar tecnologías tales como Bluetooth, ZigBee o Wi-Fi Direct para la comunicación D2D. En esta ocasión se ha decidido utilizar Wi-Fi, por su gran potencial y expansión. Desaparece así el problema de la interferencia que hubiese supuesto el elegir una alternativa inband, pero tiene la desventaja de la naturaleza no controlada de las tecnologías que se encuentran en el espectro sin licencia.

Esta tecnología aparece en impresoras, ordenadores portátiles, teléfonos móviles, cámaras de fotos y vídeo, televisiones e incluso consolas de videojuegos. Para que la comunicación entre dispositivos sea posible es necesario que exista una compatibilidad entre ellos, lo que depende del fabricante y de la gama. Por esto se considera que no todos los nodos serán capaces de actuar como nodos relay, ya que no todos los dispositivos tendrán la capacidad de utilizar Wi-Fi. Por otro lado no se ha hecho diferenciación entre tipos de nodos relayers, es decir, una vez que son capaces de reenviar datos, se asume que todos son compatibles entre sí, sin considerar las diferencias existentes entre equipos de diversos fabricantes.

Sobre su arquitectura, los dispositivos que utilicen Wi-Fi establecen un grupo Peer-to-Peer (P2P), en el que existen dos roles:

- Peer-to-Peer Group Owner (P2P-GO) : el que realiza las funciones de punto de acceso.
- Peer-to-Peer Client (P2P-C) : el que realiza las funciones de cliente Wi-Fi.

Una vez que queda establecido el grupo, éste no queda cerrado; es decir, nuevos clientes Wi-Fi pueden unirse a él, de manera que varios usuarios que actúen como clientes (aunque alguno de ellos podría ejercer también el papel de P2P-GO) se pueden conectar a un mismo relayer, siempre que no se supere la ocupación máxima del canal. Si todos los miembros del grupo estuviesen inactivos se podría decir que el grupo está apagado con el consiguiente ahorro energético, en el caso de éste trabajo se podría dar esta situación si todos los usuarios que conforman el grupo no presentan la intención de conectarse a un servicio.

En el próximo capítulo, en el que describo la herramienta empleada para acometer el análisis, se verá la aproximación realizada para obtener las tasas proporcionadas a los usuarios respecto a la distancia y si se encuentran o no en línea de vista.

Respecto a las medidas de seguridad todo dispositivo que utilice esta tecnología deberá incorporar Wi-Fi Protected Setup (WPS), para garantizar una conexión segura. Esta seguridad se consigue mediante la introducción de un PIN en el P2P-C, o presionando un botón en ambos aparatos. En la transferencia de datos se implementa el mecanismo de seguridad Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2), que usa como método de cifrado criptografía simétrica, en este caso Advanced Encryption Standard (AES)-256. Estas medidas proporcionan la confidencialidad necesaria para los datos que se intercambiarán. Pero en la simulación que se llevará a cabo en este trabajo no se implementará el nivel de seguridad ya que no se modela de manera estricta la transmisión y la recepción de datos.

#### **2.2.4. Escenarios de uso**

Se podrían encontrar múltiples escenarios para el uso de este tipo de técnicas; por ejemplo, las redes muy densas de nodos, que pueden encontrarse en acontecimientos como conciertos, teatros o lugares en los que se reúnen grandes multitudes. En este caso sería útil el uso de comunicaciones device-to-device, teniendo que tener en cuenta que si la red tiene gran densidad, las condiciones de interferencia no serán precisamente buenas.

Por otra parte se pueden dar situaciones en las que uno de los nodos se encuentre en el borde de la celda o incluso fuera de su cobertura. En el primer supuesto se debería estudiar la situación de ambos nodos, sus condiciones de SINR y ver si es viable activar el modo D2D, para lo que tiene que haber una arquitectura que proporcione esa inteligencia y tenga la capacidad de decisión, según las condiciones en cada caso particular. Por otro lado, en la segunda de las situaciones la ayuda del D2D puede ser fundamental para que el usuario que se encuentra fuera del rango de cobertura de una estación base, obtenga el servicio requerido.

### 2.2.5. Ventajas e incentivos

Respecto a las ventajas de la utilización del modo D2D se pueden mencionar desde una mejora notable de la eficiencia espectral, hasta una reducción de la exposición a la radiación electromagnética gracias a la disminución de la energía transmitida hasta la mejora en la calidad del servicio.

Por otro lado, y según el modo de trabajo que se utilice, si este es inband, se producirán problemas de interferencia ya que ambas comunicaciones trabajan en el mismo espectro. Por otra parte si el modo de trabajo es fuera de banda, podría darse un comportamiento descontrolado en ciertas situaciones, por trabajar en el espectro sin licencia. Además el D2D también introduce sobrecarga, problemas con los protocolos a utilizar para la comunicación, por no ser lo suficientemente maduros y un posible rechazo de los usuarios al modo D2D (consumos de datos y energía innecesaria). Es por eso que se están estudiando diversas medidas para compensar a los usuarios que utilizan el device-to-device por parte del operador.

Este interés por parte de los operadores se debe sobretodo a estabilizar y reducir la potencia que sus estaciones base tienen que transmitir, lo que les supondría un claro ahorro. Es en este punto en el que hay que encontrar una solución que compense a todas las partes, de manera que esa reducción de la potencia transmitida gracias a los usuarios sea recompensada. Esta cuestión es uno de los principales retos que afronta LEXNET, proyecto europeo en el que participa el Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria.

A continuación se citan brevemente algunas de estas medidas compensatorias que proponen los operadores para invitar a los usuarios a utilizar el modo device-to-device de sus dispositivos [8]. En primer lugar se hace una distinción entre tipos de mercados, ya que es determinante en las posibles propuestas que se podrían encontrar:

- Mercados abiertos (open markets)
- Mercados cerrados (sealed markets)

**Juego de Stackelberg:** Diseñado para mercados abiertos, en los que toda la información y acciones de los usuarios son públicas, y cuyo objetivo es conseguir el equilibrio de Nash<sup>1</sup>. Cada usuario individualmente toma sus propias decisiones, buscando su máximo beneficio. La teoría de juegos proporciona un marco

<sup>1</sup>El equilibrio de Nash es, en la Teoría de Juegos, un “concepto de solución” para situaciones de conflicto entre dos o más jugadores, que asume que:

- Cada jugador conoce y ha adoptado su mejor estrategia

analítico y formal con un conjunto de herramientas matemáticas para estudiar la complejidad en las interacciones entre usuarios racionales. El juego consiste en tres componentes básicos: un conjunto de jugadores, un conjunto de acciones y un conjunto de preferencias. Respecto a los jugadores, en este caso se tendrán dos tipos (estaciones base y dispositivos móviles), las acciones contendrán las decisiones de los usuarios (cuántos recursos se utilizan con D2D), y por último la evaluación de dichas acciones serán las preferencias. En escenarios como el que se contempla en este trabajo se tomará como líder la estación base y como seguidores los usuarios conectados a ella.

El operador de red proporcionará un presupuesto total (recompensa a los usuarios que utilicen D2D), que será distribuido proporcionalmente al número de recursos total de los usuarios. Si sólo dos activaran el modo D2D, todo el presupuesto sería para ellos. De este modo cada par de usuarios deberá elegir el número de recursos que utilizará en el modo D2D, teniendo en cuenta las decisiones de los demás; el momento en que se llegue a la decisión final será cuando se haya alcanzado el equilibrio de Nash, ya que ningún jugador, tomando una decisión unilateral, mejorará su utilidad.

**Subasta:** La otra opción consiste en un mecanismo de incentivos basado en una subasta, solución enfocada a mercados cerrados, escenarios en los que es importante preservar la información de los usuarios. Para ello no hay comunicación entre ellos, lo que complica el diseño del mecanismo de incentivos. En esta ocasión se establecen tres tipos de jugadores: compradores, vendedores y subastador; la estación base realizará las funciones de comprador y de subastador, y los usuarios serán los vendedores.

Una vez empieza la subasta la estación base presenta un vector con la demanda de recursos, en el que se incluyen sus restricciones, como la disponibilidad, a quién pertenece... Una vez recibido cada par de usuarios entrega un vector de respuestas en el que incluyen el menor precio al que están dispuestos a entregar esos recursos. Una vez que la estación base recoge todas las respuestas ejecuta un algoritmo de subasta, que incluye dos funciones:

- Primera fase: determinar el conjunto de ganadores de la subasta (aquellos que indicaron un menor precio).
- Segunda fase: calcular el precio a pagar a cada ganador.

Una vez planteados los incentivos para los dos tipos de mercado, habría que interesarse por la calidad de los servicios, Quality of Experience (QoE), comprobando si, tras dichos algoritmos, se ha mejorado la visión que el cliente tiene del servicio que se le ofrece, y si la remuneración por los recursos que ofrece en modo D2D ha sido suficiente o si aún hay cierto margen para mejorar. En [10] se propone mejorar la QoE desacoplando la gestión de red de los dispositivos y haciendo que pase al plano de control. Así, los terminales de usuario no han de preocuparse de la inteligencia de la

- 
- Todos los jugadores conocen las estrategias de los otros

Consecuentemente, cada jugador individual no gana nada modificando su estrategia mientras los otros mantengan las suyas. Así, cada jugador está ejecutando el mejor movimiento posible, teniendo en cuenta las estrategias de los demás jugadores.

red sino únicamente del reenvío de esos datos según les indiquen los controladores correspondientes.

## Capítulo 3

# Herramienta

En este tercer capítulo de la memoria se desgrana cada una de las partes en las que está dividida la herramienta que se ha implementado para acometer el análisis. El entorno en el que se ha desarrollado es C++, teniendo como objetivo conseguir una plataforma de simulación de escenarios con redes LTE, mediante la adhesión de diferentes módulos a un núcleo común, proporcionándole funcionalidades y ciertos comportamientos adicionales según las técnicas empleadas, como podrían ser CoMP, DUDe o D2D.

En el caso de este trabajo el estudio se ha centrado en la implementación de técnicas device-to-device. Para ello se ha centrado el desarrollo en dos fases diferenciadas; la primera ha permitido conocer el comportamiento, y poder realizar una comparativa de en qué condiciones es beneficiosa la utilización de técnicas D2D. Posteriormente, en una segunda fase se implementarán escenarios concretos en los que previamente se haya detectado que las técnicas D2D podrían resultar beneficiosas, estudiando métricas pertinentes para obtener resultados para analizar el comportamiento final de la red.

Después de esta pequeña introducción se presentará el conjunto de elementos que conforman la herramienta:

- Core o núcleo de la herramienta.
- Trazas de datos, archivos de configuración y escenarios.
- Nuevos módulos añadidos para dotar de funcionalidades concretas al núcleo inicial.

### 3.1. Core de la herramienta

Respecto al núcleo de la herramienta, se describirá brevemente, ya que el objetivo de este trabajo es el sentido y funcionalidad que proporcionaremos con la adhesión de módulos adicionales.

En primer lugar hay que resaltar que dentro de una red modelada bajo la herramienta se tienen tres tipos de componentes (usuarios, elementos de acceso y servicios). Estos tres elementos se caracterizan por unos tipos y unos parámetros. El tipo que define a

un elemento no variará a lo largo de las iteraciones de una simulación; por ejemplo, si un usuario tiene en su definición que tiene la capacidad de hacer relaying, ésta no podrá ser modificada. Por otro lado, aparecen los parámetros, que determinan las posibilidades de un elemento concreto en cada iteración, por ejemplo, en el caso de un usuario la cantidad de estaciones base con las que tiene cobertura o, en caso de que sea relayer, si algún otro usuario se encuentra conectado a él.

Es importante conocer los tipos y parámetros de los que constan cada elemento de la red:

- Usuarios:
  - Tipo: identidad, posibilidad o no de hacer relaying, servicios requeridos, ganancia de recepción y figura de ruido.
  - Parámetros: los parámetros que va a tener un usuario en el marco de este trabajo, dependen de uno de los tipos mencionados con anterioridad, capacidad para hacer relaying.
    - No relayer: información de estaciones base a las que podría acceder (SINR, eficiencia espectral, número de recursos que se utilizarían para los servicios activos, y potencia transmitida que sería destinada para ese usuario), posibilidades de conexión mediante Wi-Fi (relayers con los que tiene cobertura, tasa que proporcionarían, así como la potencia necesaria para realizar la conexión). Finalmente, tendría almacenado el método óptimo de conexión en cada iteración y los elementos de la red que atraviesa.
    - Relayer: un usuario capaz de hacer relaying tendrá todos los parámetros del no relayer, además de la información necesaria cuando un usuario está conectado a él, de esta manera en el momento que un cliente está conectado, su único posible método para acceder a la red sería mediante LTE, ya que se ha limitado el D2D a un sólo salto, para reducir la complejidad. En el caso de tener clientes conectados, habrá que considerar el grado de ocupación del canal del relayer, necesario para futuros clientes.
- Elementos de acceso:
  - Tipo: identidad, capacidad, potencia de transmisión, ganancia de transmisión, tamaño de la celda (macro, micro o pico), frecuencia y número de sectores y sus ángulos<sup>1</sup>.
  - Parámetros: grado de ocupación de la estación base y usuarios que están conectados a ella, tanto a través de D2D como directamente con recursos LTE.
- Servicios:
  - Tipo: tamaño y nombre del servicio en cada caso.
  - Parámetros: el estado del servicio en cada iteración, e información sobre si se ha cambiado la intención del usuario de mantener activo ese servicio forzosamente, por ejemplo si ha perdido la cobertura entre dos iteraciones.

---

<sup>1</sup>Respecto al número de sectores y sus ángulos, los elementos de acceso no van a estar divididos en diferentes sectores, por lo que tendrán un único sector de 360°

Cabe destacar que los servicios no siempre van a estar activos, ya que dependen de la intención del usuario de activar un determinado servicio. Esto se modelará mediante un tiempo medio de duración y un tiempo medio entre llegadas, a partir de variables aleatorias exponenciales negativas. No sólo dependerá de la intención de los usuarios de activar el servicio, sino también de las posibilidades que tiene la red para poder aceptarlo o no. Debido a que al iniciar un servicio no se puede predecir el comportamiento de la red al durante el mismo, se establecen diferentes posibles estados por los que podría pasar cualquier servicio:

- **IDLE:** Se considera que el servicio se encuentra en este estado mientras no tenga intención de conectarse; todo servicio que se encuentre en este estado no será tenido en cuenta a la hora de establecer las conexiones en una iteración concreta.
- **INITIATED:** Este estado se utiliza para un servicio que en la fotografía anterior se encontraba desconectado y ha cambiado su intención, solicitando acceso a la red.
- **ACTIVE:** Se considera activo a todo servicio que está siendo atendido por la red tras superar el estado anterior.
- **SUCCEEDED:** Una vez que un servicio se encuentre en este estado, será considerado como finalizado satisfactoriamente.
- **REJECTED:** Cuando un servicio tiene intención de conectarse a la red, pero esta se encuentra saturada, o el usuario se encuentra fuera de cobertura, será rechazado por la red, sin llegar siquiera al estado de iniciado.
- **DROPPED:** Un servicio será tirado, cuando tras haber estado en estado activo, la red lo rechaza y no finaliza adecuadamente; se considera que esta situación es peor desde un punto de vista de calidad, que la de rechazado antes de comenzar.

Una vez que se han definido todos los posibles estados en que se encontrará un servicio, se establece una máquina de estados con las posibilidades de pasar de uno a otro entre iteraciones, ver la Figura 3.1. Para el cambio de un estado a otro, se establecen tres valores:

- Intención de la iteración anterior (0=FALSE;1=TRUE)
- Intención de la iteración actual (0=FALSE;1=TRUE)
- Cambio forzoso en la iteración anterior (0=FALSE;1=TRUE)

A continuación se explica con más detalle las posibles transiciones entre estados:

- **IDLE ->IDLE:** se mantendrá en este estado mientras la intención anterior y la actual se mantengan en false.
- **IDLE ->INITIATED:** cambiará a initiated en el momento en que, tras permanecer en false durante un tiempo, cambie a true en la iteración actual, y sea posible establecer la conexión a la red.
- **IDLE ->REJECTED:** un servicio será rechazado en el momento en que siendo la intención actual true tras haber estado en el estado idle, no sea aceptado por la red.

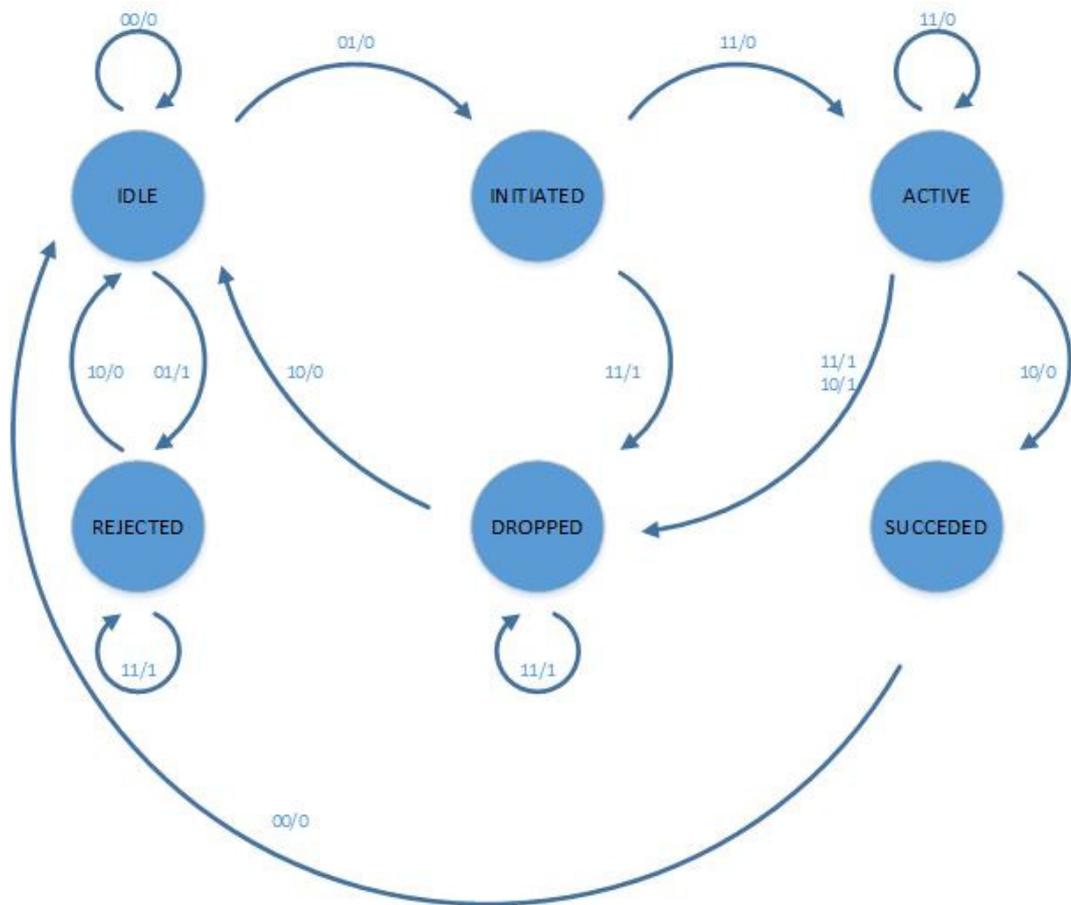


Figura 3.1: Máquina de estados en los que se puede encontrar un servicio

- INITIATED ->ACTIVE: una vez que la intención ha cambiado a true, si el servicio es aceptado por la red, pasará a active.
- INITIATED ->DROPPED: se asume que el servicio ya ha sido iniciado; si, manteniendo la intención a true, la red no permite mantener la conexión, será tirado.
- ACTIVE ->ACTIVE: mientras la intención del usuario siga a true, y la red pueda seguir aceptándolo, el servicio se mantendrá en estado activo.
- ACTIVE ->SUCCEEDED: si el servicio se ha mantenido en activo hasta que la intención del usuario cambie nuevamente a false, se puede decir que ha finalizado satisfactoriamente.
- ACTIVE ->DROPPED : un servicio puede pasar de activo a tirado; por ejemplo, tras la pérdida de cobertura, lo que causa que se pierda la conexión.
- REJECTED ->REJECTED: una vez que el servicio ha sido rechazado, mientras la intención del usuario siga siendo true, se mantendrá en dicho estado.

- REJECTED ->IDLE: se pasa a idle cuando, una vez que el servicio ha sido rechazado, la intención actual cambie a false nuevamente.
- DROPPED ->DROPPED: una vez que el servicio ha sido tirado, seguirá en este estado mientras la intención se mantenga a true.
- DROPPED ->IDLE: pasará de tirado a inactivo cuando la intención del usuario sea nuevamente false.
- SUCCEDED ->IDLE: una vez que el servicio ha finalizado satisfactoriamente, la intención del servicio se mantiene en false durante un tiempo, pasando al estado inactivo hasta que se vuelva a iniciar de nuevo.

Por último es importante reseñar que, aunque un servicio se desarrolla de manera satisfactoria pasando de Idle-Iniciated-Active-Succeded, en la conexión que abarca diferentes fotografías, la cobertura se puede obtener mediante D2D o utilizando directamente recursos LTE y dentro de cada una de éstas alternativas, se puede pasar de un relayer a otro y de una estación base a otra respectivamente. Esto causaría traspasos entre dispositivos o, incluso, tecnologías, que no son beneficiosas, por lo que deben ser evitados dentro de lo posible.

Una vez que se han descrito los tipos y parámetros de los elementos de red, es importante reseñar que tanto los usuarios como las estaciones base van a estar guardadas en contenedores sobre los que se va a poder iterar. Respecto a los servicios van a ser definidos dentro del tipo correspondiente a los usuarios como se ha comentado con anterioridad.

### 3.2. Trazas, archivos de configuración y escenarios

Las trazas de datos de los usuarios y de las estaciones base, junto con el archivo de configuración utilizado se utilizan para alimentar el núcleo de la herramienta que será llamado desde el escenario. Para comprender lo que realiza la herramienta internamente se pueden seguir los pasos propuestos en la Figura 3.2.

- En primer lugar y parseando el archivo de configuración, se establecerá la red a utilizar. Tipo de área, dimensiones del escenario, tiempo de simulación, intervalo de iteración, información sobre los usuarios (número, tipos y posibles servicios a los que acceden) y elementos de acceso (número y tipos).
- En segundo lugar, si se trata de la primera iteración, se realizará un despliegue de todos los elementos de la red, asignando las posiciones a usuarios y estaciones base e inicializando para iteraciones posteriores los posibles servicios. Todo esto se encuentra en las trazas de datos.
- En tercer lugar, se actualizarán las posiciones de los elementos y el estado de los servicios, según la información de las trazas de datos y considerando además las posibilidades de la red en ese instante.
- En cuarto y último lugar se ejecutarán las acciones pertinentes según las clases que se hayan añadido al escenario simulado. Una vez se haya realizado el análisis completo se habrá concluido con una fotografía y pasará a la siguiente.

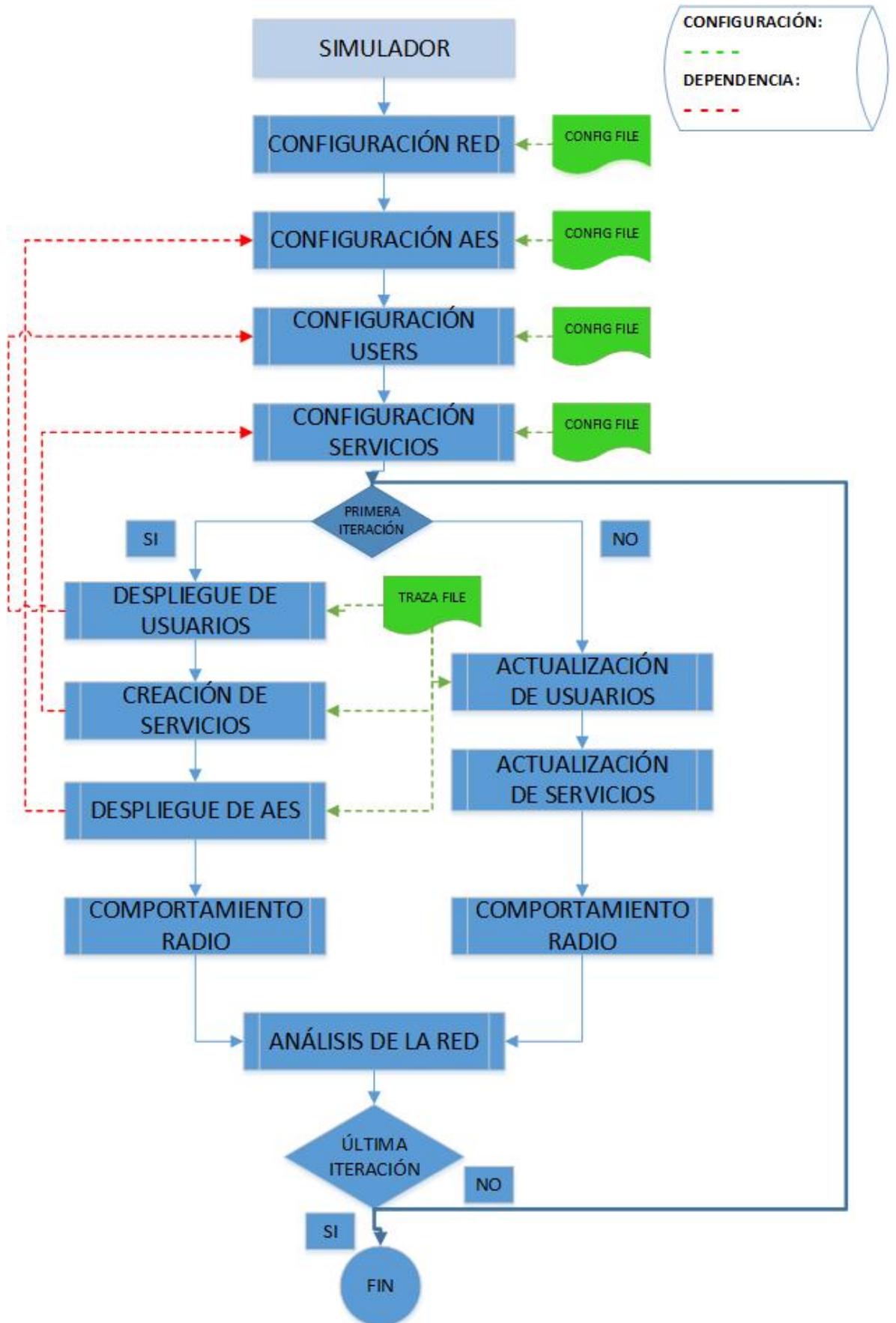


Figura 3.2: Funcionamiento de la herramienta

### 3.3. Módulos adheridos

En esta parte de la descripción de la herramienta se describen los desarrollos para conseguir tanto el comportamiento device-to-device como una conexión normal LTE. En concreto, se pretende conseguir el objetivo final de minimizar el gasto energético realizado por el operador, para así lograr una menor exposición a campos electromagnéticos. Para ello, se debe observar en qué casos es mejor la utilización del D2D y en cuáles no, estudiando la potencia utilizada en cada situación. Para obtener esa potencia aparecen dos opciones: aplicar directamente LTE o utilizar las técnicas D2D combinadas con LTE. Para ello se emplean las Ecuaciones 2.2 y 2.3, vistas con anterioridad y siguiendo las diferentes acciones que aparecen en la Figura 3.3.

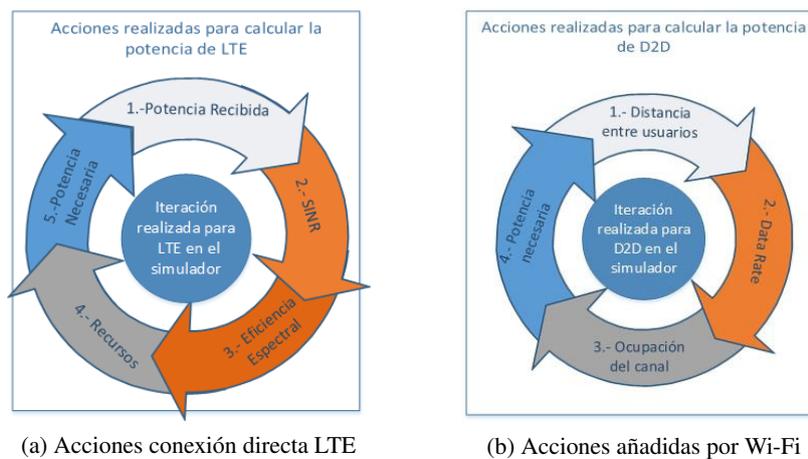


Figura 3.3: Acciones realizadas en la simulación

#### 3.3.1. Directamente LTE

En primer lugar se describe el caso en el que se utiliza una conexión directa LTE, para lo que se deben seguir los pasos de la Figura 3.3a, sobre un escenario similar al mostrado en la Figura 2.4a y obteniendo como resultado la potencia total que aparece en la Ecuación 2.2.

##### Potencia recibida

Para establecer la potencia necesaria por cada usuario, hay que realizar el cálculo de la que se recibe por cada usuario por parte de todas las estaciones base del escenario (en este punto aún no se aplican restricciones para verificar si será suficiente para satisfacer los servicios requeridos por ese usuario). En este caso las expresiones necesarias se han descrito en el capítulo de LTE, al presentar su modelo de propagación. La Ecuación 2.1 define el comportamiento de la potencia recibida, pero primero es necesario el cálculo previo del pathloss, según lo recogido en la Tabla 2.2.

Para calcular la potencia recibida se itera sobre el contenedor de usuarios y, posteriormente, sobre el de elementos de acceso, para establecer todas las potencias que

reciben todos los usuarios de todas las estaciones base. Cada vez que se realiza el cálculo para una pareja usuario-elemento de acceso se realiza una llamada a una función para que devuelva el pathloss, a través de los parámetros adecuados de ambos elementos.

Finalmente, para poder analizar posteriormente el comportamiento del sistema todas esas potencias serán almacenadas en el contenedor donde se almacenan los parámetros de usuario.

### SINR

El siguiente paso, tal y como muestra la Figura 3.3a, es la obtención de la relación señal a ruido e interferencia para cada usuario, respecto de cada estación base. Este parámetro depende de ciertas constantes que se verán a continuación, del parámetro calculado en el paso anterior (potencia recibida) y de una interferencia que generan el resto de usuarios y de estaciones base a su alrededor, con una mayor incidencia cuanto más cerca estén y especialmente si están en línea de vista.

Se emplea la expresión siguiente:

$$SINR = \frac{Potencia\ Recibida}{N0 * BwRb * NTRB + Interferencia\ Aleatoria}$$

donde:

- *Potencia Recibida*: es la potencia calculada anteriormente.
- *N0*: es el ruido blanco gaussiano constante, que afecta a todos los usuarios definido por:

$$N0 = K \cdot T$$

La constante de Boltzmann  $K = 1.38^{-23} J/k$  y la temperatura ambiente  $T = 300 k$

- *BwRb*: ancho de banda por resource block, 180 kHz.
- *NTRB*: número total de resource blocks del elemento de acceso.
- *Interferencia Aleatoria*: la interferencia real sólo se puede calcular una vez el escenario esté conectado, porque depende del resto de conexiones existentes, por lo que inicialmente se le da un valor aleatorio entre 3 y 6 dB.

Una vez se han desarrollado todos estos cálculos hay que tener en cuenta que si la SINR que hay entre la pareja usuario-estación base es demasiado baja, la conexión entre los dos elementos no sería satisfactoria, por lo que se fija un umbral a partir del cual se establece que la conexión sería factible. El valor elegido para este umbral es de  $-10dB$ , a partir del cual se genera, para cada usuario, la información de SINR procedente de las estaciones base seleccionadas. Esta información también será almacenada con el resto de parámetros de usuario.

### Eficiencia espectral

En este siguiente paso se realiza el cálculo de la capacidad al utilizar LTE, a partir de la eficiencia espectral del canal. Para ello se ha tomado como principio básico teórico la expresión de Shannon, según la expresión que se muestra seguidamente:

$$Eficiencia Espectral = BwEff \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{SINR}{Eficiencia SINR} \right)$$

Se han tenido que ajustar dos parámetros para adecuar el comportamiento al de un radioenlace LTE, obteniendo fácilmente, una vez conocida la relación señal a ruido a la que está sometida el usuario, la cantidad de bits por herzio que puede transmitirse en un segundo [11]:

- *BwEff*: ancho de banda eficaz, que se corresponde con la constante 0.85.
- *Eficiencia SINR*: eficiencia de la SINR, ajustada a 1.25.

En este caso también se establece un umbral, que limitando la eficiencia espectral a 5 bits por segundo y por herzio, ya que en una situación real no se superaría ese límite. De este modo se elige el mínimo entre 5 y el resultado obtenido a partir de los cálculos matemáticos. Una vez se dispone de los resultados finales se almacenan de nuevo en los parámetros de usuario.

### Recursos necesarios

A continuación se realiza el cálculo de los recursos necesarios para cubrir las necesidades de cada usuario; este valor puede considerarse como un número real, aunque en la realidad debería ser un número entero. En esta parte del desarrollo jugará un papel primordial que cada uno de los usuarios del escenario tendrá unas necesidades diferentes según el tipo de servicio que esté usando (video-streaming, transmisión de datos, llamadas de teléfono...). Se limitará el número de servicios activos por usuario a uno para limitar la complejidad del análisis.

La fórmula con la que se calcula el número de recursos será:

$$Numero\ de\ resource\ blocks = \frac{Trafico\ ofrecido}{BwRb \cdot Eficiencia\ Espectral}$$

Donde:

- *Trafico ofrecido*: capacidad necesaria para satisfacer el servicio.
- *BwRb*: ancho de banda que ocupa cada recurso, 180 kHz.
- *Eficiencia Espectral*: depende del parámetro calculado en el paso anterior.

El número necesario de resource blocks no puede superar al número total de resource blocks que tiene la estación base; si esto se cumple, los resultados obtenidos en esta fase también serán almacenados como parámetros de usuario.

### Potencia final utilizada

Las estaciones base elegidas en la simulación jugarán un papel primordial en esta fase, puesto que su potencia de transmisión y el número total de recursos que tienen, serán determinantes en el cálculo de la potencia final necesaria para cubrir las necesidades de cada usuario.

En esta ocasión, la ecuación que permite determinar dicha potencia es la que se muestra seguidamente, dependiendo de la potencia transmitida y del número total de recursos de la estación base:

$$Potencia\ utilizada = \frac{Numero\ de\ resource\ blocks \cdot PTx}{NTRB}$$

Una vez llegados a este punto, se habrían finalizado los cálculos de la potencia necesaria para realizar la conexión LTE.

### 3.3.2. Aplicación de técnicas D2D

En segundo lugar se analiza la tecnología device-to-device combinada con LTE, para lo que se deben seguir los pasos de la Figura 3.3a, combinados en esta ocasión con la Figura 3.3b. Se utilizará un escenario como el que recoge la Figura 2.4b y el objetivo final será obtener la potencia total, según la Ecuación 2.3.

Se presentan a continuación los parámetros necesarios para establecer la potencia necesaria en la estación base para dar servicio a los dos usuarios. En este caso, para la conexión directa LTE entre el usuario que hace forwarding y la estación base, se necesita la comunicación previa entre el relayer y el otro terminal debido a que requiere conocer la cantidad de recursos que tiene que pedir al elemento de acceso a la red para satisfacer las necesidades de ambos. Se calcula el valor de la potencia necesaria para la conexión Wi-Fi, según los pasos de la Figura 3.3b.

### Data Rate

En primer lugar se obtiene la velocidad de transmisión que se ofrece al cliente, que depende de la distancia entre el relayer y el terminal final, y si se encuentran en línea de vista o no. En el Tabla 3.1 se mapean las tasas que proporciona 802.11g (desde 6 Mbps hasta 54 Mbps), en función de ambos parámetros. Para las ocasiones en que hay LOS se sigue una función por partes:

$$Data\ Rate_{LOS}(p1, p2, d) = \begin{cases} A & \text{si } d < p1 \\ k \cdot \left\{ \frac{1}{d} - \frac{1}{p2} \right\} & \text{si } p1 \leq d < p2 \\ 0 & \text{si } p2 \leq d \end{cases}$$

donde  $k = A/(1/P_1 - 1/P_2)$ . Y en las ocasiones sin línea de vista se utiliza una función Sigmoidal:

$$Data\ Rate_{NLOS}(p1, p2, d) = A \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{1 + e^{-p1 \cdot (d-p2)}} \right\}$$

Donde  $(p1, p2)_{NLOS} = (0.076, 63.97)$  y  $(p1, p2)_{LOS} = (78.47, 270.85)$ .

Tabla 3.1: Mapeo de la velocidad de 802.11g

Tasa (Mbps)	Distancia para LOS(m)	Distancia para NLOS(m)
54	0-42.5	0-18
48	42.5-94	18-45.5
36	94-116	45.5-60.5
24	116-139.5	60.5-70
18	139.5-162.5	70-77
12	162.5-184	77-83
9	184-202.5	83-88.5
6	202.5-214.5	88.5-92

Hay que definir además la probabilidad de estar en LOS y en NLOS. En este caso se ha fijado que con un 30% de probabilidad se está en línea de vista. Por último, hay que remarcar que la tasa que se recoge en la tabla, no será la real proporcionada por la tecnología Wi-Fi, ya que su rendimiento neto ronda el 40%. Debido a este motivo las tasas reales definitivas serán 21.6Mbps, 19.2Mbps, 14.4Mbps, 9.6Mbps, 7.2Mbps, 4.8Mbps, 3.6Mbps y 2.4Mbps.

### Potencia necesaria

Una vez se tiene la tasa de transferencia entre los dos nodos, el siguiente paso es calcular cual será la ocupación del canal Wi-Fi. Dependerá de la velocidad que se haya fijado, de manera que a mayor tasa (bits por segundo), menor será también el tiempo de ocupación del canal; asimismo dependerá del servicio que esté activo ya que no tiene la misma necesidad de transferencia de tráfico una videollamada que el envío de un mensaje mediante una red social, por ejemplo. Por tanto, la expresión que definirá la ocupación del canal es:

$$Ocupacion = \frac{Trafico\ requerido\ por\ el\ servicio}{Data\ Rate}$$

Esta ocupación relativa es inferior a 1, por lo que si la distancia es larga y se asigna la menor tasa posible, 2.4Mbps, la máxima capacidad que se puede ofrecer será: 2.4Mb.

Por último se debe comentar que la potencia máxima cuando la ocupación del canal Wi-Fi es 100% se fija a 0.1W. Así, la expresión de la potencia necesaria para llevar a cabo el D2D es:

$$Potencia\ total = Potencia\ maxima \cdot Ocupacion$$

### Combinación de tecnologías

Por último, una vez que se tiene la potencia necesaria para la conexión entre el nodo que hace el forwarding y el que recibe la información se debe aplicar la combinación de estas técnicas con LTE, ya que el nodo relayer tendrá que pedir recursos a la estación base para satisfacer sus necesidades y las de todos sus clientes.

Se dispone así de una conexión directa del relayer con la estación base, para la que se realizarán todos los pasos descritos anteriormente, desde el cálculo de la potencia recibida por el nodo hasta la determinación del número de recursos que debe asignar la estación base, según la ecuación que se recuerda a continuación:

$$\text{Numero de resource blocks} = \frac{\text{Trafico ofrecido}}{BwRb \cdot \text{Eficiencia Espectral}}$$

Como se puede observar los recursos dependerán del tráfico ofrecido, que en el caso anterior era únicamente del usuario que se conectaba directamente a la estación base. Ahora este número será :

$$\text{Trafico ofrecido} = \sum_{i=0}^{\text{num total clientes}} TO_i + TO_{\text{relayer}}$$

La suma del tráfico que requiere el usuario que se conecta directamente a la estación base con los tráficos que requieren todos sus clientes conformarán el total del tráfico ofrecido por la estación base a ese grupo P2P. Posteriormente, se realizará el cálculo de recursos y de potencia utilizada para ese nuevo tráfico. Una vez se tiene dicho parámetro se añade la potencia necesaria por parte del relayer para transmitir la información a sus clientes Wi-Fi.

## Capítulo 4

# Resultados

Este capítulo se divide en dos partes: la primera describe el comportamiento de la herramienta para un escenario sencillo, con dos usuarios y una estación base, comparando en qué condiciones de SINR resulta útil aplicar técnicas D2D o utilizar directamente LTE; posteriormente, la segunda fase estará dedicada al análisis de escenarios para los que se presupone un buen comportamiento de las técnicas D2D, como podrían ser conciertos o lugares con grandes multitudes de usuarios.

### 4.1. Fase 1: Escenario de prueba

En esta primera fase, se comprueba el correcto funcionamiento de la herramienta en un escenario sencillo, con una sola estación base y dos usuarios, uno del tipo relay y otro no. Se pretende identificar en qué condiciones de SINR para ambos usuarios resulta más beneficioso, en términos de potencia, el uso del device-to-device. En esta ocasión, para la comprobación de que el comportamiento de la herramienta es el adecuado se ha implementado el modelo teórico en Matlab. Sobre ese modelo se puede comprobar la potencia consumida para la conexión D2D o LTE, según las diferentes condiciones de SINR de ambos usuarios.

Se contemplan tres elementos fundamentales para ver el funcionamiento de la herramienta (SINR del usuario 1, SINR del usuario 2 y la tasa binaria, data rate, entre ellos); pero hay que tener en cuenta que el escenario de prueba será grande y, como las posiciones de los usuarios van a ser aleatorias, en la mayoría de iteraciones no se va tener información usando D2D, ya que en el caso óptimo la distancia máxima entre los usuarios para que haya comunicación es de 214.5 m. Por eso se va a fijar la tasa para el D2D constante para todas iteraciones, sin considerar así la potencia añadida con el Wi-Fi, que también resultará constante. Esto se llevará a cabo en 8 ocasiones, una por cada posible tasa.

Por todo esto, se considera un escenario que emula el representado en la parte derecha de la Figura 4.1 utilizando en la herramienta un despliegue similar al que se ve en la izquierda. Se consigue así reducir su complejidad, utilizando una única estación base.

Se asume que a cada uno de los usuarios se les pretende proporcionar un servicio de 1Mb, que siempre estará activo; además hay que tener en cuenta las limitaciones

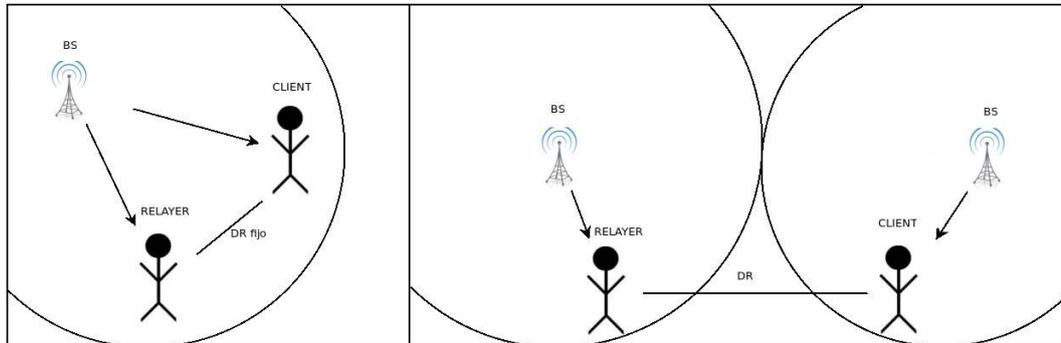


Figura 4.1: Despliegue simulado (izquierda) y escenario emulado (derecha)

de eficiencia espectral que se han comentado en el apartado anterior (se tiene una eficiencia espectral máxima de 5 bits por herzio y por segundo). De estos parámetros se concluye que la SINR a partir de la que no es posible obtener mejora en aspectos de capacidad del canal es 18.602 dB. Obteniéndose de:

$$S_{eff} = Bw_{Eff} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{SINR}{SINR_{Eff}} \right)$$

Se recuerda que el  $Bw_{Eff} = 0.85$  y la  $SINR_{Eff} = 1.25$ .

A continuación se muestran los resultados obtenidos, realizando la simulación para posiciones aleatorias de ambos usuarios (en un área de  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ ). Para intentar recorrer todos los valores de SINR de ambos usuarios se realiza un número elevado de experimentos, en concreto 1000000 cada 10s. Los resultados se representan, junto con el valor teórico, en las Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.

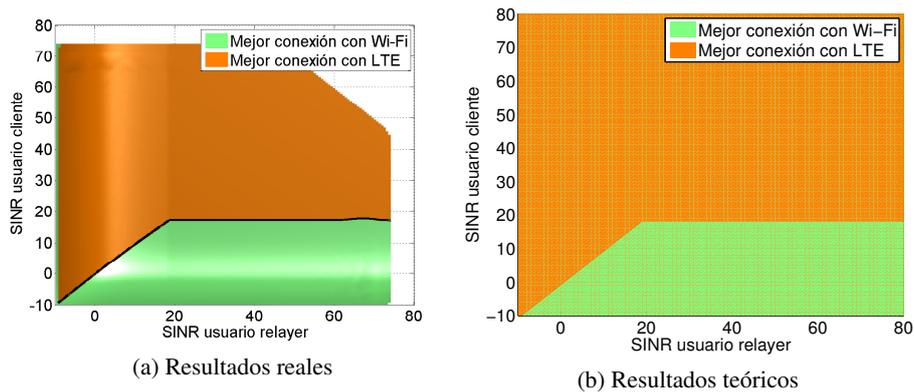


Figura 4.2: Resultados para tasa bruta 6Mb

Del conjunto de resultados obtenidos se concluye que, sea cual sea la tasa ofrecida por la tecnología Wi-Fi, no afecta al comportamiento del escenario, ya que la potencia

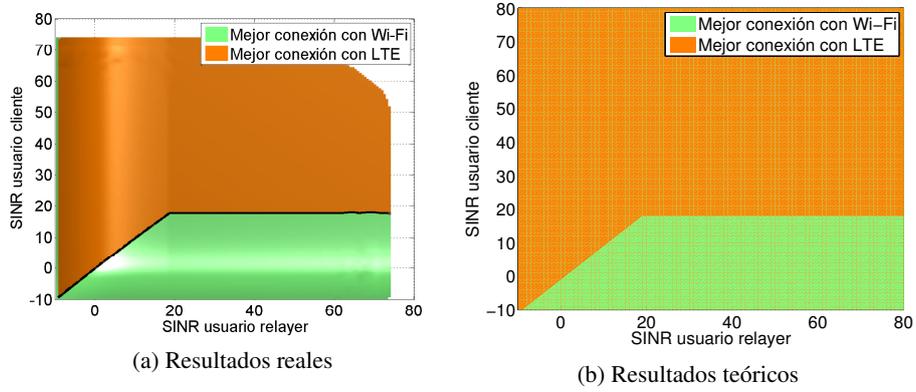


Figura 4.3: Resultados para tasa bruta 9Mb

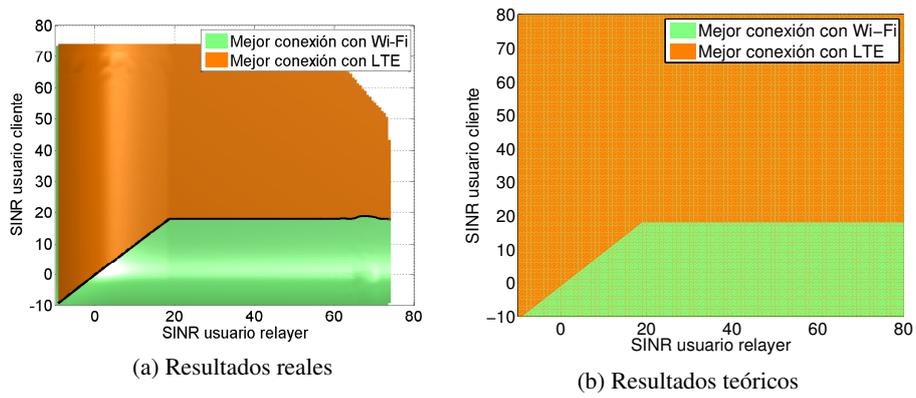


Figura 4.4: Resultados para tasa bruta 12Mb

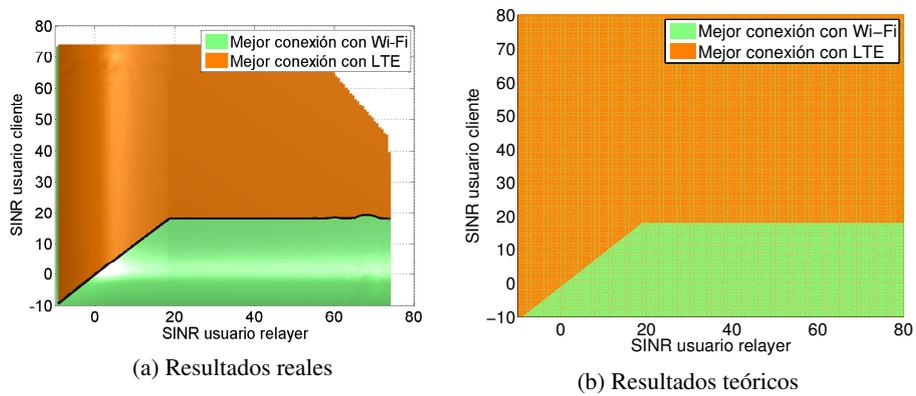


Figura 4.5: Resultados para tasa bruta 18b

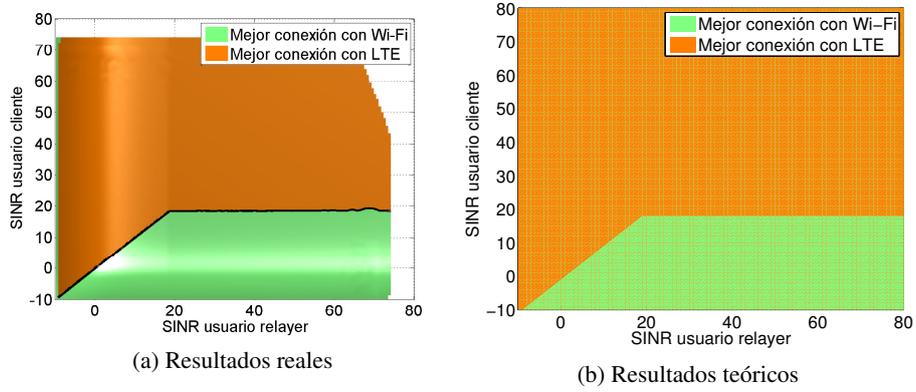


Figura 4.6: Resultados para tasa bruta 24Mb

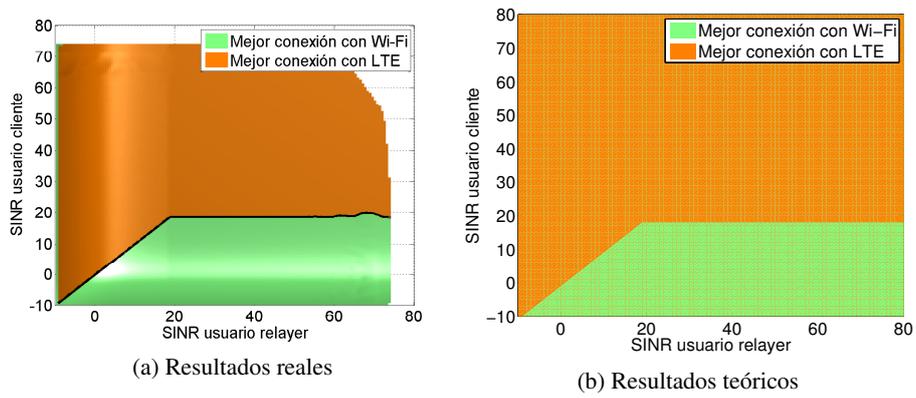


Figura 4.7: Resultados para tasa bruta 36Mb

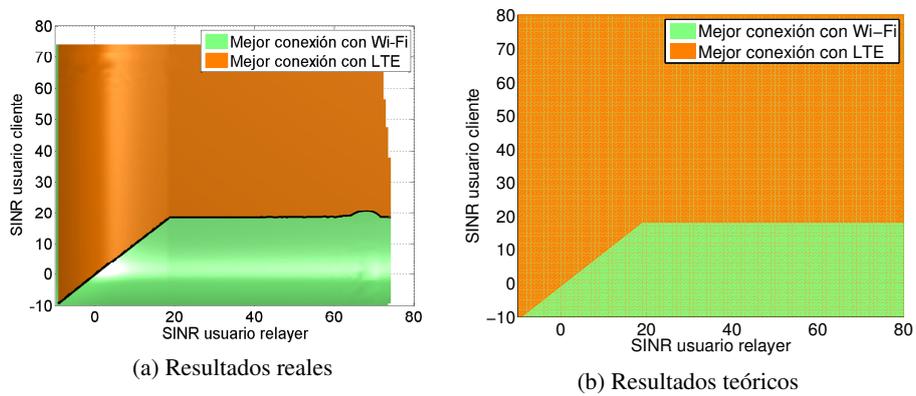


Figura 4.8: Resultados para tasa bruta 48Mb

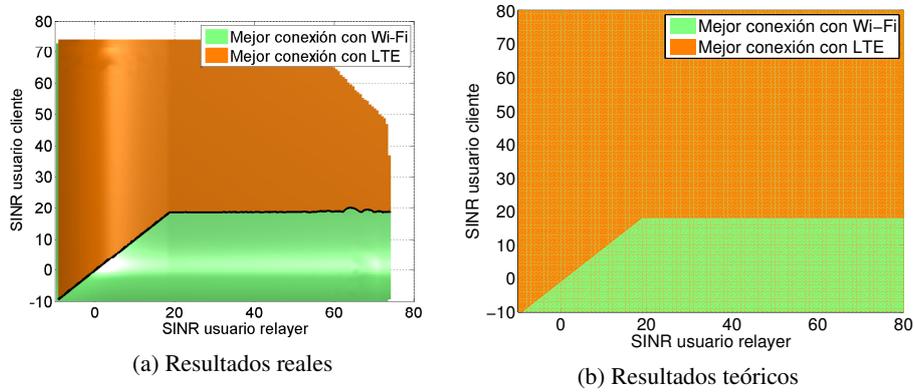


Figura 4.9: Resultados para tasa bruta 54Mb

de más introducida es muy baja respecto a la total necesaria para realizar la conexión. Se estudiará el efecto de la menor y la mayor de las tasas:  $6Mb$  y  $54Mb$ . Para una potencia máxima Wi-Fi de  $0.1W$ , y cursando un servicio como el del escenario de  $1Mb$  se tendría:

$$P_{necesaria} = P_{max} \cdot \frac{TO}{Tasa_{neta}} = 0.1 \cdot \frac{1}{Tasa_{bruta} \cdot 0.4}$$

La potencia necesaria para el mejor y el peor caso será de  $0.00463W$  y  $0.0417W$ , respectivamente, ambos despreciables frente a la potencia de transmisión de la antena, aproximadamente  $40W$ .

También es importante notar que el tráfico ofrecido máximo por servicio en el peor de los casos ( $6Mb$ ) para no superar la ocupación máxima del canal Wi-Fi, serán  $2.4Mb$ .

## 4.2. Fase 2: Escenario Fijo

En esta segunda fase, una vez conocido el comportamiento de las técnicas D2D y de las conexiones mediante LTE en términos de potencia, se particularizará el estudio sobre un escenario concreto, elegido para asegurar el beneficio de aplicar D2D.

### 4.2.1. Descripción del escenario

La opción elegida para el escenario es un área de  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ , cubierta por una sola macroestación omnidireccional en la que se mueven los usuarios, que se incrementan desde 50 a 500, con paso 50. De cada configuración se realizarán 10 repeticiones de 360 fotografías cada 10s, para asegurar la validez estadística del análisis.

Cada usuario podrá cursar un único tipo de servicio, para evitar la complejidad que supondría considerar más de uno. Para este escenario se definen, además dos tipos de servicios:

- Servicio 1: Se cursa una conexión a Internet de  $200\text{k}$ , con tiempo medio entre llegadas  $120\text{s}$ , y tiempo medio de servicio  $30\text{s}$ .
- Servicio 2: Se cursa una descarga de vídeo de  $1\text{M}$ , con tiempo medio entre llegadas  $600\text{s}$ , y tiempo medio de servicio  $180\text{s}$ .

Una vez descritos los servicios, hay que diferenciar los tipos de usuario, según la política de acceso que vayan a seguir. Sabiendo que hay dos posibles escenarios de conexión; en el primero siempre se va a intentar conectar mediante LTE, y en el segundo el usuario seguirá una política de acceso que le permita reducir al máximo el consumo de potencia en la conexión, eligiendo Wi-Fi o LTE según sean sus condiciones y las de los usuarios vecinos.

Por todo lo anterior, cuando sólo se pueda utilizar como acceso LTE, se distinguen los dos siguientes tipos de usuarios:

- Tipo 1: Usuario cursando servicio 1 (70%).
- Tipo 2: Usuario cursando servicio 2 (30%).

En cambio, para la segunda de las opciones, se diferencian dos tipos de usuario y cada uno de ellos puede acceder a dos posibles servicios, teniendo:

Tipos de usuario respecto a su capacidad de reenvío:

- Tipo 1: Usuario con capacidad de hacer relaying (probabilidad del 60%).
- Tipo 2: Usuario sin posibilidad de hacer relaying (probabilidad del 40%).

Teniendo en cuenta lo anterior, se distinguen cuatro tipos de usuarios finales:

- Tipo 1: Usuario relayer cursando servicio 1 ( $60\% \cdot 70\% = 42\%$ ).
- Tipo 2: Usuario relayer cursando servicio 2 ( $60\% \cdot 30\% = 18\%$ ).

- Tipo 3: Usuario no relayar cursando servicio 1 ( $40\% \cdot 70\% = 28\%$ ).
- Tipo 4: Usuario no relayar cursando servicio 2 ( $40\% \cdot 30\% = 12\%$ ).

Una vez se tienen diferenciados los usuarios según la política de acceso, se realiza el cálculo de la carga máxima requerida por el conjunto total de usuarios desplegados en el escenario:

$$\begin{aligned} \text{Carga máxima} &= \text{Usuarios} \cdot \left( \text{Prob serv 1} \cdot \text{Trafico serv 1} \cdot \frac{T_{s1}}{T_{llegadas}} + \text{Prob serv 2} \cdot \text{Trafico serv 2} \cdot \frac{T_{s1}}{T_{llegadas}} \right) \\ &= 500 \cdot \left( 0.7 \cdot 0.2 \cdot \frac{30}{120} + 0.3 \cdot 1 \cdot \frac{180}{600} \right) = 62.5 \text{MB} \end{aligned}$$

La carga aceptada por la estación base en las mejores condiciones de eficiencia espectral es de:

$$\text{Carga aceptada} = \text{Sef}_{f_{optima}} \cdot B_{wRB} \cdot N_{TRB} = 5 \cdot 0.18 \cdot 100 = 90 \text{MB}$$

A la vista de los resultados anteriores se llega a la conclusión de que la estación base no va a rechazar o tirar servicios si éstos se encontrasen en condiciones óptimas, ya que la carga máxima que podrá cursar la estación en condiciones óptimas es mayor a la necesaria para cubrir toda la demanda. Pero no es posible asegurar esas condiciones óptimas, por lo que se pueden encontrar usuarios fuera del rango de cobertura de la estación o situaciones de saturación de la misma y, de este modo producirse rechazos, si la política de acceso obliga a usar una conexión directa LTE. Si, en cambio, se utilizase la mejor alternativa, se podría intentar conectar mediante D2D si hubiese relayers cercanos, incluso si estuviera fuera de la cobertura directa de la estación base.

A continuación se explicará el módulo añadido a la herramienta que nos proporciona la inteligencia necesaria para conectarse siguiendo el criterio indicado, esto es, cuando sea beneficioso, en términos de potencia, la utilización de las técnicas D2D.

Se recorrerá todo el contenedor de usuarios para tratar de conectarlos, siempre que la intención correspondiente para ese usuario sea afirmativa, en cuyo caso, se procede a descargar del módulo de parámetros la información referente a las dos posibles políticas; en la primera se establece (si hubiese cobertura) la potencia necesaria para una conexión LTE desde la estación base y en la segunda (si hubiese relayers disponibles), una lista de las posibles conexiones hacia ellos.

Una vez que se tiene la lista de las posibles conexiones a las que puede acceder, se podría dar el caso que ambas estén vacías, diciendo que el usuario no tiene conexión. En caso contrario se procederá a analizar las diferentes posibilidades según el usuario sea de tipo relayar o no.

Se describe en primer lugar el procedimiento para un usuario que no tiene la capacidad de hacer relaying. Si sólo hubiese información para la política LTE se analiza si la estación base tiene recursos para aceptar al usuario, aceptando la conexión en caso afirmativo. En cambio, si únicamente hubiese información para la conexión mediante

D2D, se chequearía si el relayer al que se pretende conectar puede aceptarlo, es decir, la ocupación de su canal Wi-Fi no ha llegado al máximo. Si no fuera así, se elimina esa posible conexión, comprobando la siguiente. Una vez que se dispone de un nodo para reenviar la información, se procede a comprobar si la estación tiene recursos suficientes para realizar la conexión; si así fuera, se conecta, y en caso contrario elimina dicha alternativa, procesando la siguiente. Si es posible realizar la conexión a través de otro usuario, se conectará también el usuario que le proporcionará el servicio de reenvío.

Finalmente se analiza la situación en la que hay información para poder conectarse con ambas opciones. En primer lugar se selecciona la opción óptima en términos de potencia para las dos. Si el relayer con el que se conectaría tiene por su parte intención de conectarse a la red, se mirará la SINR que poseen cada uno de ellos, tal y como se analizó en la fase previa, para saber cuál será la conexión óptima para el acceso de los dos usuarios. Según las condiciones de SINR, se selecciona la conexión más favorable y, si es posible, se establece la conexión. En caso contrario se procede a analizar la información restante. En segundo lugar, si el relayer que habilita la conexión no tiene intención de conectarse, se seleccionará la alternativa que menos potencia requiera, procediendo tal y como se ha explicado con anterioridad.

En segundo lugar, si el usuario que se trata de conectar fuese relayer, se realizarán comprobaciones adicionales. Se comenzará mirando si al menos un usuario se ha conectado a través de él; si así fuera, se considera que está conectado. En caso contrario, este usuario, aunque sea relayer, tendrá la posibilidad de conectarse a través de otro, aunque imposibilitaría que algún otro usuario le podría utilizar, para establecer, una conexión D2D. Posteriormente, se procede a comprobar, como en el caso anterior, cada una de las posibilidades de las que se tiene información.

#### 4.2.2. Métricas

Se realizarán todas las medidas para las dos políticas de acceso descritas, y para diferentes potencias de transmisión de la antena, comprobando así los diferentes comportamientos que eso produce sobre los usuarios. De esta manera se verá, si mediante las técnicas D2D aplicadas se puede conservar el número de servicios exitosos respecto a los que se obtendrían mediante LTE, y cómo afecta el número de usuarios al rendimiento de ambas políticas.

En primer lugar se obtienen gráficas para caracterizar el comportamiento de los servicios en el escenario. Para ello se han hecho medidas del número de servicios exitosos, tirados y rechazados, para cada configuración, respecto del total que se deberían cursar (información que se encuentra en las trazas de usuario). Se analizan para ambas políticas, y para los dos tipos de servicio que se tienen en el escenario. De este modo se obtienen los resultados de la Figura 4.10.

En primer lugar, se apuntan grandes diferencias entre el comportamiento de los servicios 1 y 2. Esto se debe a la diferencia en la duración de ambos: el servicio 2 dura 6 veces más, en media, que el servicio 1. Se advierte que es mucho más probable que un servicio del segundo tipo sea tirado o rechazado para una conexión directa, puesto que bajo esa política no se tiene una segunda alternativa de conexión sobre la que el

usuario se pueda respaldar. Este mal comportamiento no se advierte de manera tan clara en la opción en que se conectan mediante el criterio D2D.

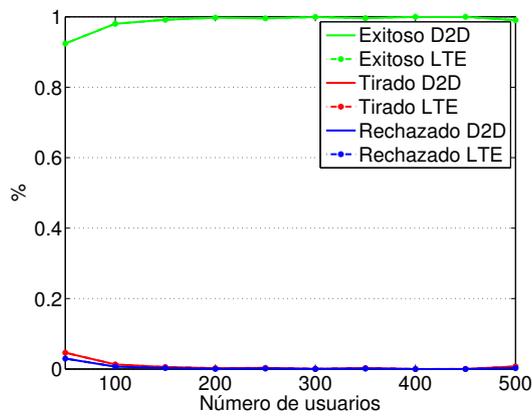
Esta tendencia se mantiene para todas las potencias de transmisión de la antena que se han considerado, aunque se comprueba una mejoría al aumentarse la potencia de transmisión, ya que mejoran las condiciones del canal, y aumentan las probabilidades de éxito. Se concluye de estas gráficas que los servicios no se ven perjudicados aplicando la política de acceso D2D, además, cuanto mayor sea la duración media del servicio, mejor comportamiento se encuentra al aplicar dicho criterio de conexión.

Una vez se han estudiado las métricas referentes al número de éxitos y fracasos de los servicios, se considera interesante analizar en qué momento se tiran o se rechazan, dependiendo de la política de acceso y la potencia de transmisión de la antena. Las Figuras 4.11 y 4.12 representan el porcentaje del tiempo que los servicios de cada tipo estuvieron activos, frente a su duración prevista, información que se obtiene de las trazas.

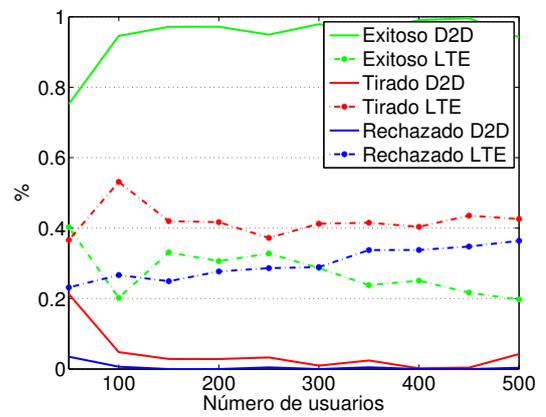
De las figuras se puede concluir que cuanto más alta es la potencia de transmisión, más tarde se tiran los servicios, ya que las condiciones del canal son más beneficiosas; además se pone de manifiesto una gran diferencia entre el tiempo que se encuentran activos para la situación en que se aplica el criterio de conexión y en la que no, siendo mucho mejor la situación en la que si se aplica. También se comprueba que la tendencia a mejorar se acentúa al aumentar el número de usuarios si se permite el uso de conexiones D2D.

Se puede concluir, por tanto, que aplicando estas nuevas técnicas no se perjudica a los servicios, porque para todas las potencias de transmisión de la antena se obtiene un mejor comportamiento tanto en el tiempo de duración del servicio como en el número de servicios exitosos. También se ha visto que el comportamiento que sigue un servicio depende en gran medida de su demanda de capacidad y del número de usuarios en el escenario. Por último se advierte que en la situación en que la conexión se realiza mediante LTE es más probable para todas las potencias de transmisión que un servicio no finalice adecuadamente. A medida que se disminuye la potencia de transmisión de la antena esa diferencia se va acentuando.

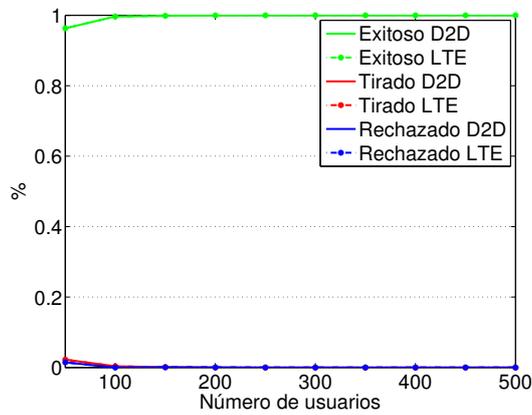
De los análisis anteriores se pueden obtener diferentes comparativas. Aplicando el criterio de conexión D2D, se observan para el servicio 2, que es el más perjudicado, un 25%, 10% y 8% de servicios que no acaban satisfactoriamente, para las tres potencias de antena y con el escenario de 50 usuarios. Esta situación se puede comparar con lo que ocurre aplicando directamente LTE y la potencia de transmisión de la antena más alta, dando lugar a un 40% de fracaso. Se ve, por tanto, que la aplicación de conexiones D2D permite reducir la potencia de transmisión de la antena, obteniendo una eficiencia de los servicios similar a la que tenemos utilizando directamente LTE con la mayor de las potencias. De ahí se concluye que podríamos obtener el mismo throughput de los servicios con una menor potencia de transmisión, suponiendo esto un claro ahorro de emisión electromagnética. Además, a medida que se incrementan los usuarios, la ganancia sigue quedando patente.



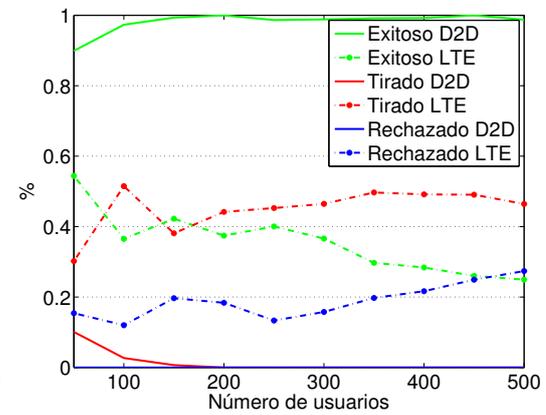
(a) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 6dB



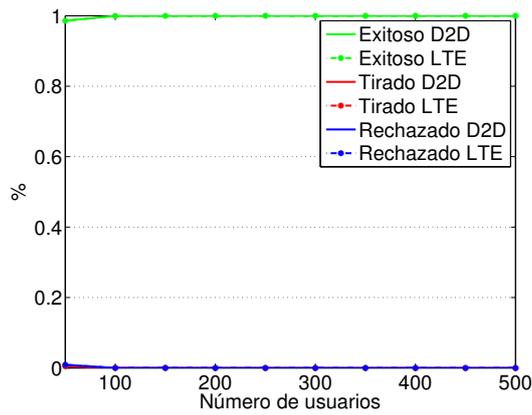
(b) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 6dB



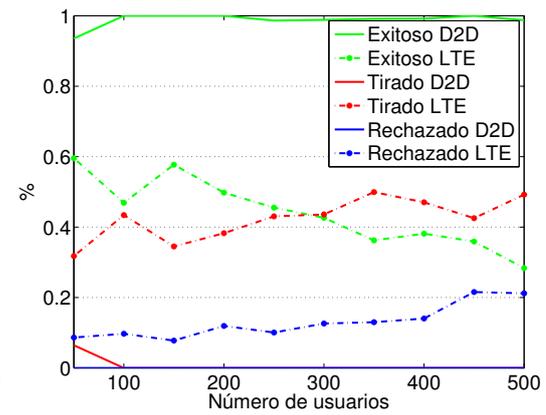
(c) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 11dB



(d) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 11dB



(e) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 16dB



(f) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 16dB

Figura 4.10: Comportamiento de los servicios

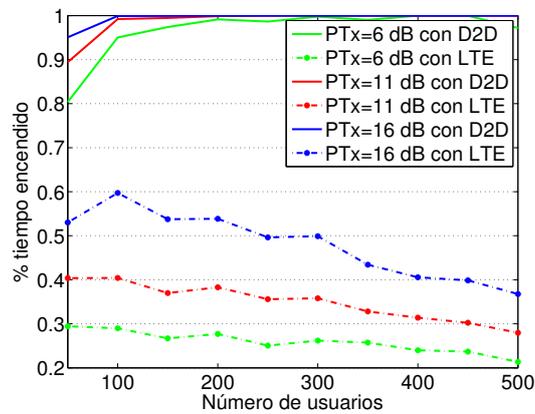


Figura 4.11: Tiempo para el servicio 1

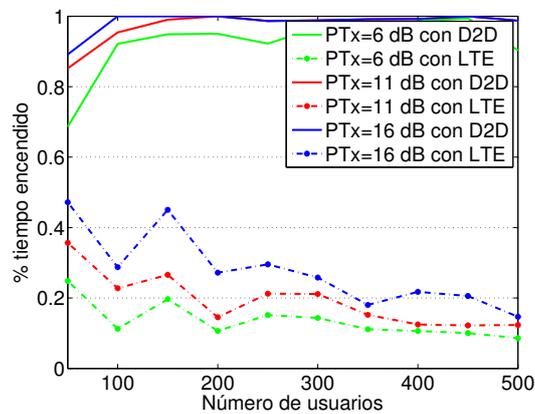


Figura 4.12: Tiempo para el servicio 2

En segundo lugar, se procede al análisis de la carga de las estaciones base. Se realizará una comparativa de la carga media de las estaciones base en términos de potencia, según el número de usuarios en el escenario y, posteriormente, se particularizará para 50, 250 y 450 usuarios el análisis temporal en uno de los experimentos realizados.

Se ha analizado inicialmente la carga de la estación a lo largo de todas las fotografías y repeticiones, para todas las configuraciones. De este análisis se obtienen las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, de las que se concluye que cuantos más usuarios haya, mayor será la carga de la estación base, lo que se podría haber previsto, ya que más usuarios generan un mayor número de servicios activos en cada fotografía.

Se pone de manifiesto que hay situaciones en las que se consume una mayor potencia cuando se habilitan las conexiones D2D. Este resultado, a primera vista, no parece muy coherente con el objetivo inicial en este trabajo, reducir la exposición electromagnética, pero hay una explicación razonable. Como se ha visto en el análisis de los servicios, se cursan satisfactoriamente muchos más cuando usan conexiones D2D,

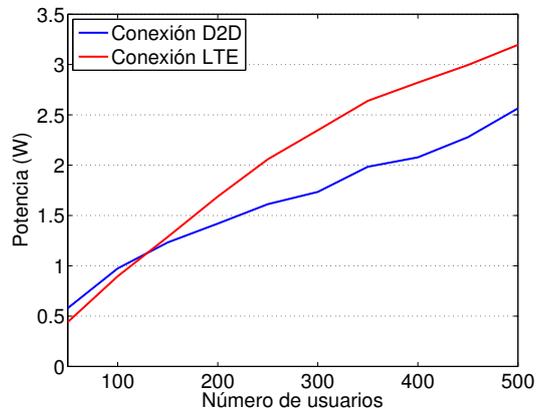


Figura 4.13: Potencia media consumida por los usuarios para  $PT_x=6\text{dB}$

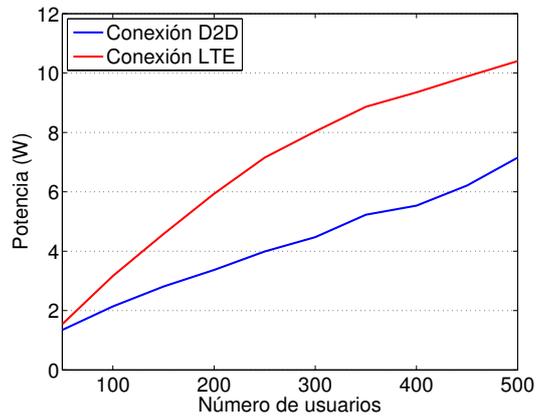


Figura 4.14: Potencia media consumida por los usuarios para  $PT_x=11\text{dB}$

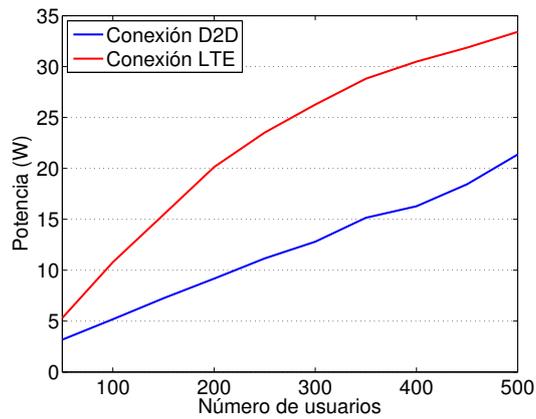


Figura 4.15: Potencia media consumida por los usuarios para  $PT_x=16\text{dB}$

causando un mayor tráfico cursado. Para la obtención de este parámetro en cada iteración es necesario que se haga una distinción entre servicios; es decir, la antena debe llevar un control del número de servicios que está cursando de cada tipo y de la tecnología que utiliza para cursarlos. De este análisis se generan las Figuras 4.16-4.18, de las que se concluye que cuanto mayor sea la potencia de transmisión de la antena, menor es la diferencia del tráfico cursado en las dos situaciones, ya que se reduce el número de servicios tirados o rechazados, especialmente en las conexiones directas LTE.

En resumen, aunque se requiera una mayor potencia, su eficiencia es mucho mayor en situaciones en las que se usa la política planteada en este trabajo, tal y como se puede observar en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, que representan la eficiencia de los Wattios transmitidos respecto a los Mb cursados. Muestran un comportamiento que mejora a medida que se incrementa el número de usuarios, debido a que existirán más alternativas de conexión D2D en condiciones de eficiencia espectral óptima, manteniéndose las características de la conexión directa LTE.

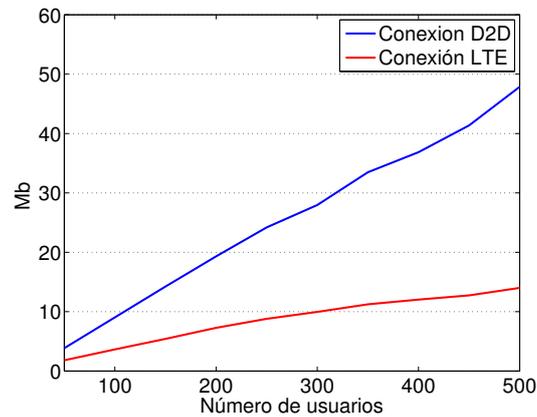


Figura 4.16: Tráfico cursado para potencia de transmisión 6dB

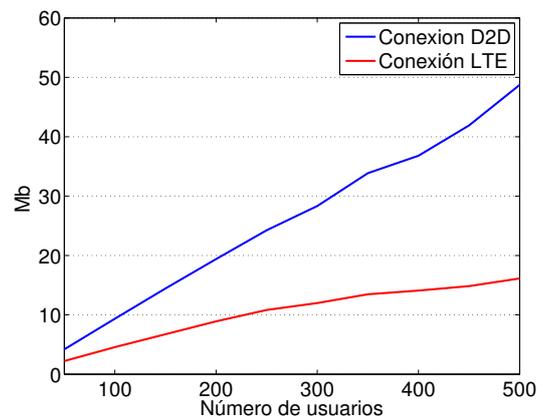


Figura 4.17: Tráfico cursado para potencia de transmisión 11dB

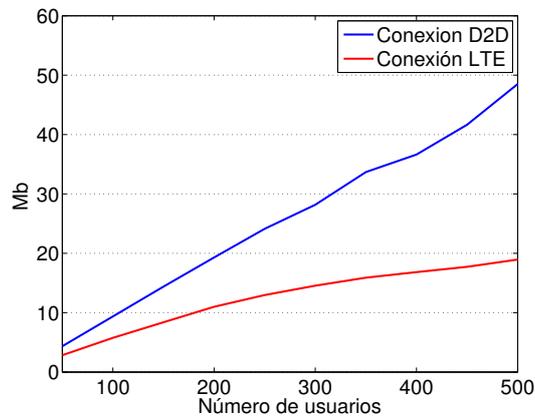


Figura 4.18: Tráfico cursado para potencia de transmisión 16dB

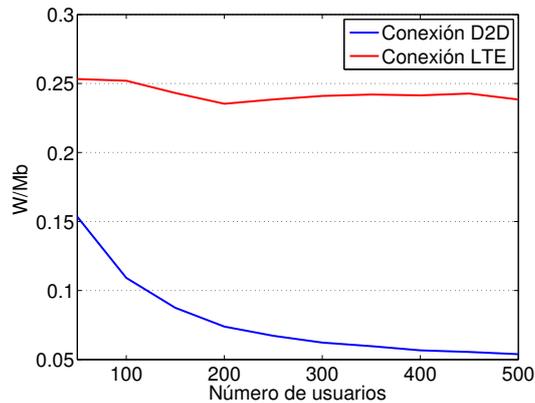


Figura 4.19: Potencia media según el tráfico cursado para PTx=6dB

Todo el análisis anterior se ha realizado en términos de potencia, por lo que es difícil realizar una comparativa de la carga que tiene la estación base para diferentes potencias de transmisión de la antena. Debido a esto se realizará un nuevo análisis, estudiando en esta ocasión los recursos utilizados, ya que aunque se modifique la potencia de transmisión, el número de recursos se mantiene fijo en 100.

A continuación se muestran los resultados correspondientes a los recursos medios requeridos según el número de usuarios, Figuras 4.22, 4.23 y 4.24. Se extrae la misma conclusión que de las correspondientes a la potencia, debido a que vuelve a producirse un aumento de los recursos utilizados según el número de usuarios. Se ve un ligero aumento con la potencia de transmisión, debido a que se mantienen activos más servicios a potencias más altas.

En la Figura 4.25 se presenta una comparativa para las tres potencias de transmisión de la antena, para las dos posibles políticas de acceso, permitiendo estudiar así la

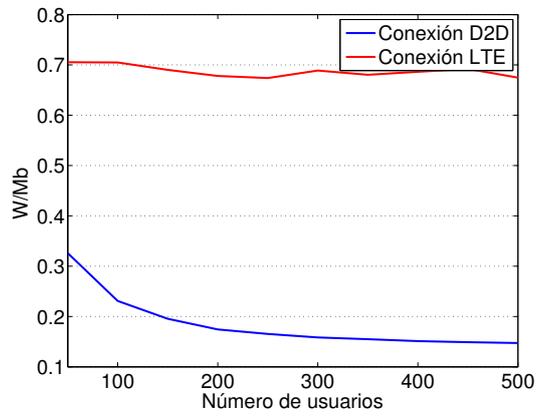


Figura 4.20: Potencia media según el tráfico cursado para  $P_{Tx}=11\text{dB}$

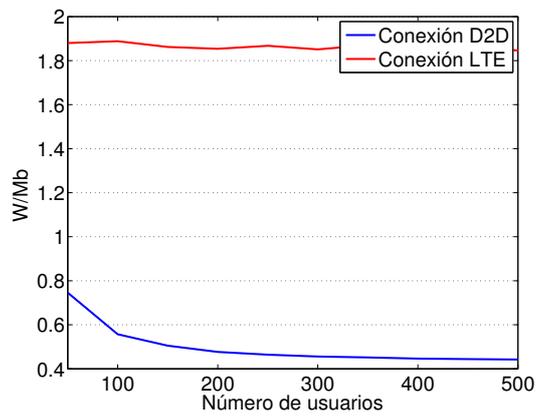


Figura 4.21: Potencia media según el tráfico cursado para  $P_{Tx}=16\text{dB}$

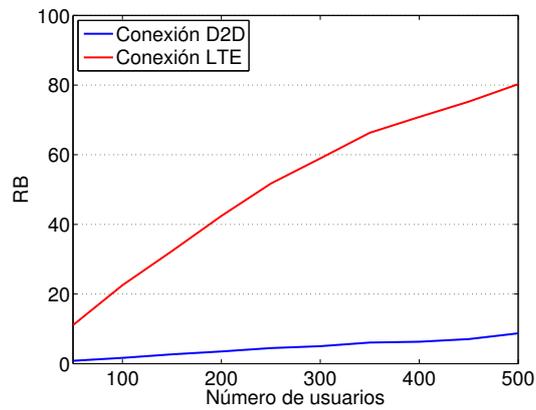


Figura 4.22: Resource blocks utilizados para  $P_{Tx}=6\text{dB}$

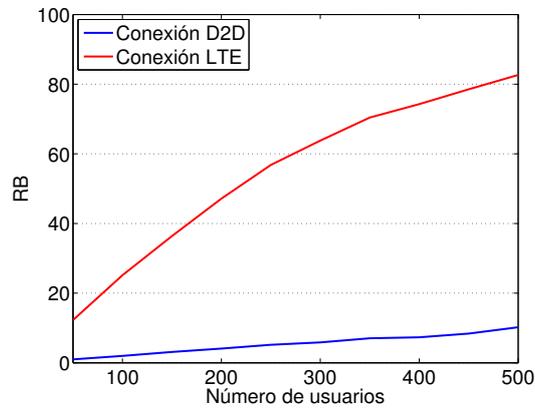


Figura 4.23: Resource blocks utilizados para  $PT_x=11\text{dB}$

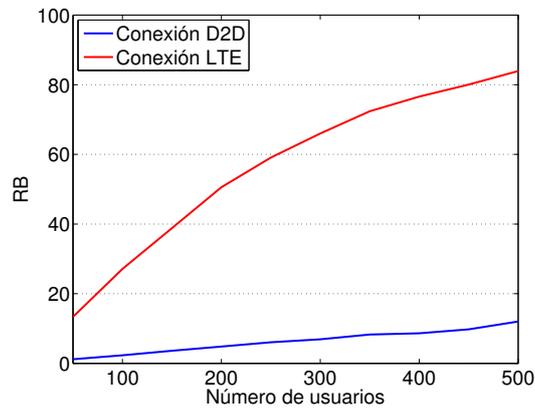


Figura 4.24: Resource blocks utilizados para  $PT_x=16\text{dB}$

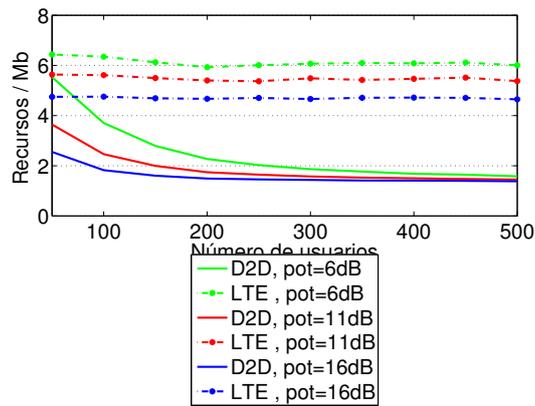


Figura 4.25: Resource blocks / tráfico cursado

eficiencia de los recursos. Se observa un comportamiento estable para conexiones LTE, independientemente del número de usuarios; en cambio, se observa un mejor comportamiento de la eficiencia de los recursos en el acceso con D2D a medida que se incrementa el número de usuarios en el escenario. Esta última cuestión se plantea como uno de los grandes beneficios en la posible implantación de las técnicas D2D en las actuales redes 4G, o en un futuro, en las redes 5G.

Hasta el momento, se han obtenido métricas que caracterizan los valores medios para cada configuración; hay que tener en cuenta que dicho promedio no proporciona toda la información, por lo que será interesante comprobar el comportamiento temporal para ambas políticas de acceso, y diferentes potencias de transmisión de la antena, a lo largo de un experimento (1 hora). Para ello se ha analizado la carga de la estación (potencia y recursos) para 50, 250 y 450 usuarios, obteniéndose los resultados recogidos en las Figuras 4.26, 4.27, y 4.28.

De estos resultados se destaca el buen comportamiento de las técnicas D2D combinadas con LTE, proporcionando una gran estabilidad al aumentar el número de usuarios. Esto contrasta con lo observado para el acceso mediante LTE, produciéndose fluctuaciones de recursos y potencia, independientemente del número de usuarios en el escenario.

Se puede concluir, por tanto, que con bajas densidades de usuarios no hay una mejora notable al aplicar la política D2D, pero a medida que se incrementa la diferencia crece notablemente, estabilizando el comportamiento y manteniendo el consumo en un nivel mucho más bajo que con LTE.

También hay que resaltar que cuanto más alta sea la potencia de transmisión de la antena, mejor será la calidad del canal y la estabilidad será aún mayor para la opción D2D. Además, la calidad del canal de los relayers cercanos será mejor, incrementando las opciones de que alguno cercano tenga una conexión óptima con la estación base, por lo que el rendimiento aumenta cuanto mayor es la potencia de transmisión de la antena.

A continuación, se realizará un análisis de los handovers que se producen para cada tipo de servicio y todos los usuarios. De esta métrica sólo se estudiará la política de acceso D2D, ya que únicamente hay una estación base LTE, por lo que, si el servicio fuese aceptado, se cursará a través de la única antena disponible.

Esta métrica se analiza calculando el número medio de traspasos por cada tipo de servicio, ya que sus duraciones son diferentes; así a un usuario que esté cursando el servicio 1 (el de duración corta), le afectará en mayor medida que en su conexión haya dos traspasos que a otro que curse el servicio 2. Además el número de traspasos se calculará para cada configuración (densidad de usuarios), ya que cuantos más usuarios haya en el escenario mayor será el número total de traspasos, por haber más servicios cursándose.

Además de las consideraciones anteriores, hay que tener en cuenta que hay muchas más probabilidades de que se tire un servicio de tipo 2, por lo que no sería apropiado medir el número de traspasos en la duración media del servicio. De este modo, las

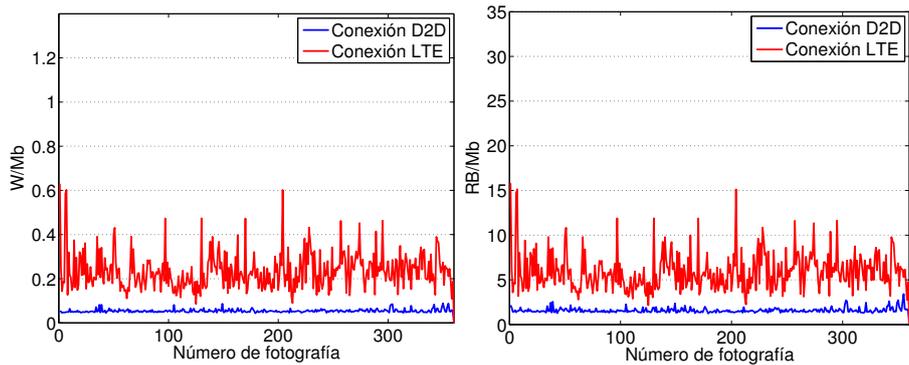
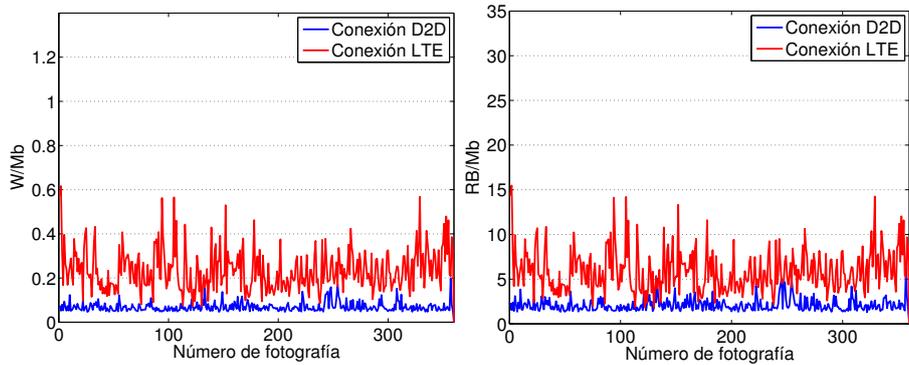
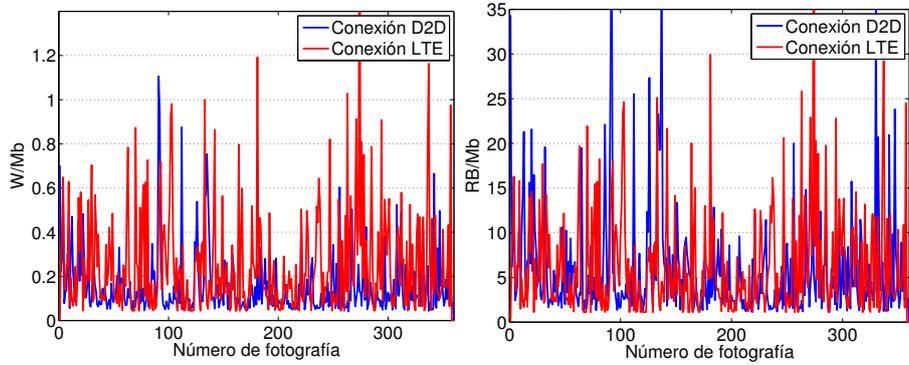
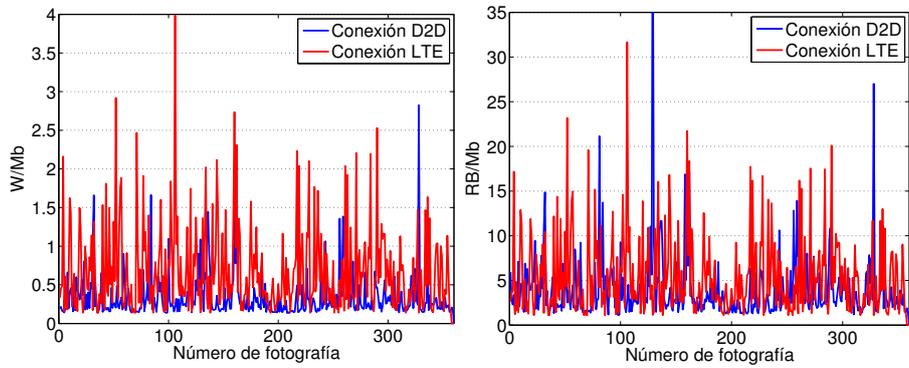
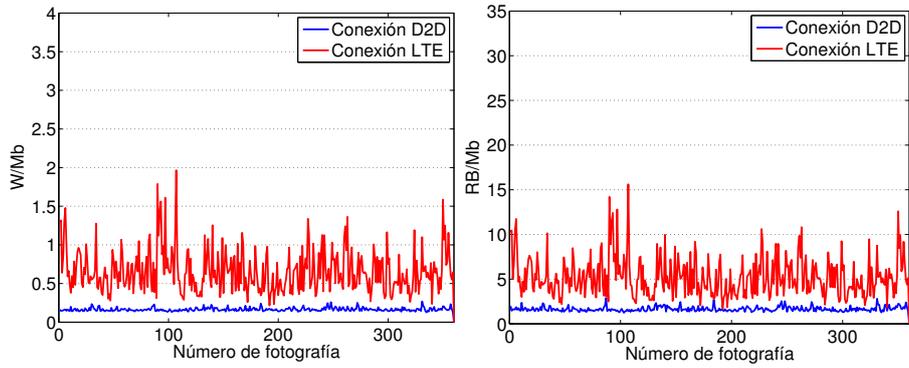


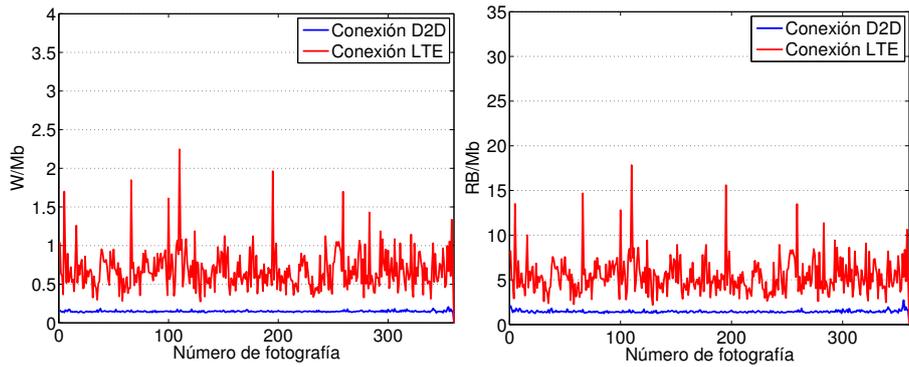
Figura 4.26: Medidas en la hora cargada para  $P_{Tx}=6dB$



(a) Eficiencia de la potencia para 50 usuarios (b) Eficiencia de los recursos para 50 usuarios

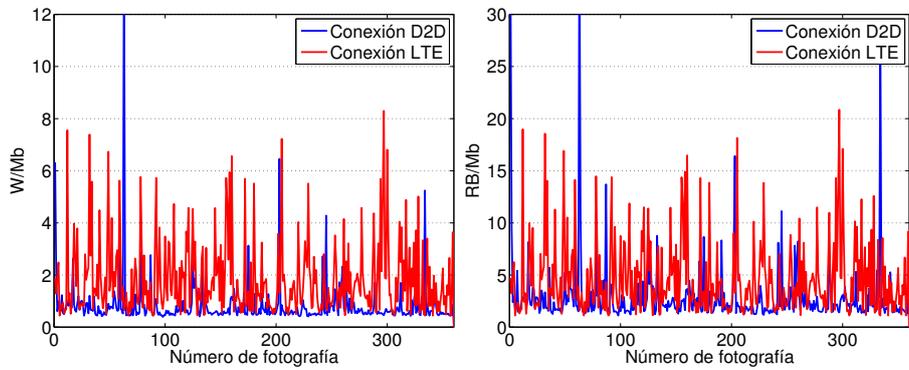


(c) Eficiencia de la potencia para 250 usuarios (d) Eficiencia de los recursos para 250 usuarios

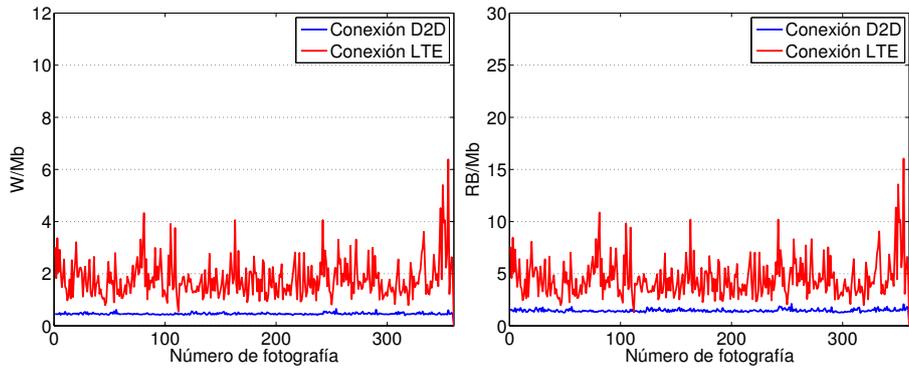


(e) Eficiencia de la potencia para 450 usuarios (f) Eficiencia de los recursos para 450 usuarios

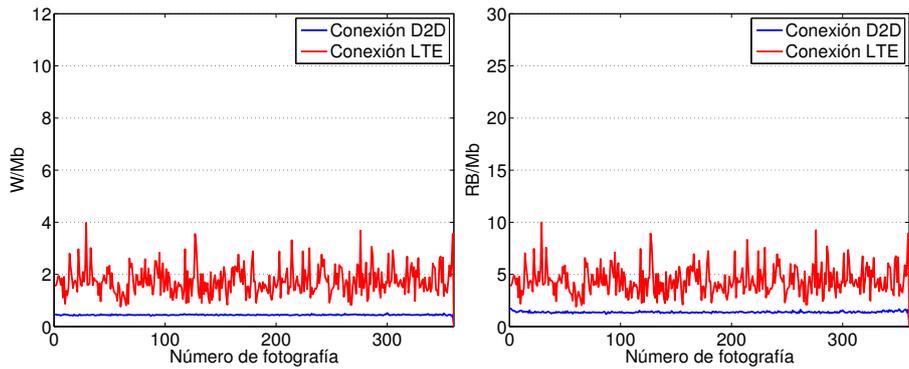
Figura 4.27: Medidas en la hora cargada para  $P_{Tx}=11\text{dB}$



(a) Eficiencia de la potencia para 50 usuarios (b) Eficiencia de los recursos para 50 usuarios



(c) Eficiencia de la potencia para 250 usuarios (d) Eficiencia de los recursos para 250 usuarios



(e) Eficiencia de la potencia para 450 usuarios (f) Eficiencia de los recursos para 450 usuarios

Figura 4.28: Medidas en la hora cargada para  $P_{Tx}=16\text{dB}$

medidas que se presentan serán diferenciadas para cada tipo de servicio, y por unidad de tiempo que el servicio se encuentra activo.

Para poder analizar el número de traspasos que se producen en la red, hay que distinguir entre los dos tipos que pueden darse:

- Verticales: Se producen cuando se cambia de tipo de conexión entre iteraciones, bien porque se produzca un cambio de D2D a LTE o viceversa.
- Horizontales: Se producirán, cuando se cambia el relayer en la conexión. Cabe recordar que existen otras posibilidades: que el relayer cambie de estación base o cambiar de BS en LTE, no son posibles, debido a que sólo hay una única estación en el escenario.

A continuación, en las Figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se presentan los resultados referentes a los traspasos por unidad de tiempo para cada tipo de servicio y para las potencias de transmisión analizadas.

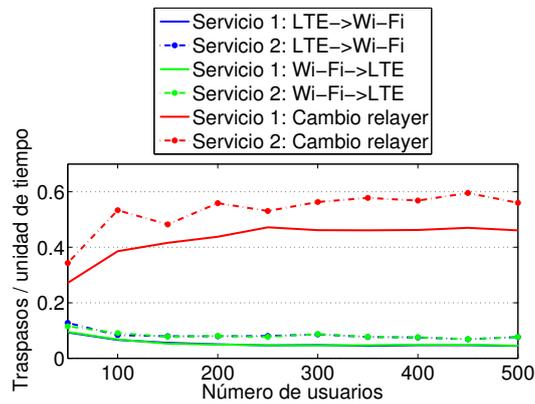


Figura 4.29: Traspasos diferenciados en servicios con  $PT_x=6\text{dB}$

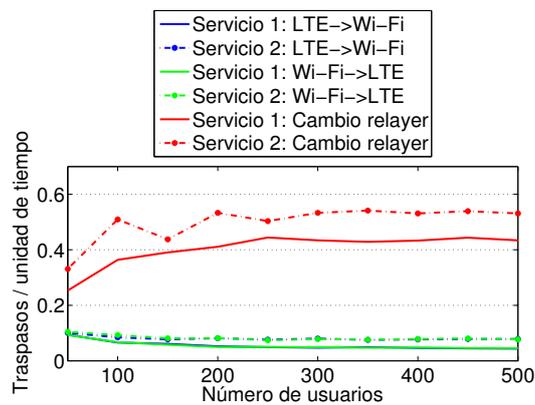


Figura 4.30: Traspasos diferenciados en servicios con  $PT_x=11\text{dB}$

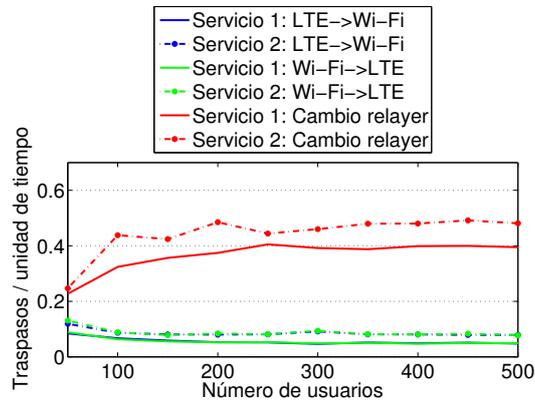


Figura 4.31: Trasposos diferenciados en servicios con  $PT_x=16\text{dB}$

Tras un primer análisis de los resultados de los trasposos parece interesante tratar de reducirlos, puesto que el número de trasposos horizontales es considerablemente alto. Si se pudieran reducir sin perjudicar a los servicios, sería una mejora interesante, incrementando la calidad de servicio percibida por el usuario.

Por esta razón se ha realizado una nueva implementación de la herramienta para tratar de reducir este tipo de handovers, se repitieron nuevamente todos los experimentos, comprobando que se mejora la calidad de servicios cursados, tal y como se pone de manifiesto en el Anexo A.

Las Figuras 4.32, 4.33 y 4.34 muestran los trasposos tras modificar la política de acceso, viendo como se han reducido en un 5% simplemente manteniendo como información en el terminal móvil el relayer con el que se ha conectado en la iteración anterior. Así, en la siguiente iteración ese relayer sigue estando disponible y, en términos de potencia, sigue siendo mejor utilizar una conexión D2D, se mantendrá dicho nodo intermedio, evitando así un trasposo, aunque no sea la alternativa óptima.

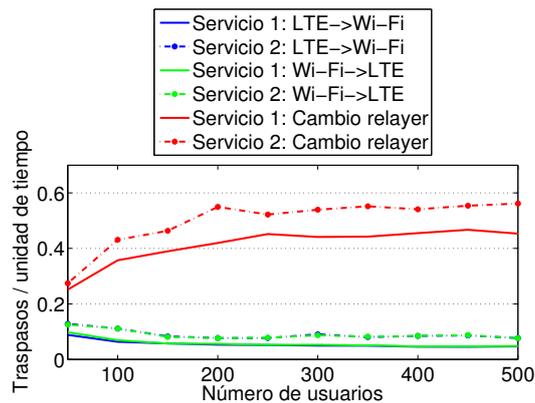


Figura 4.32: Trasposos diferenciados en servicios con  $PT_x=6\text{dB}$

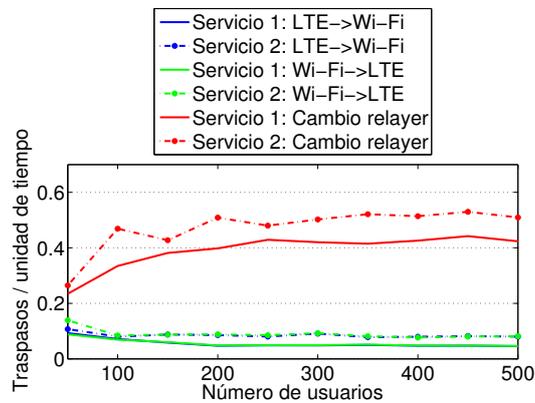


Figura 4.33: Traspasos diferenciados en servicios con  $PT_x=11\text{dB}$

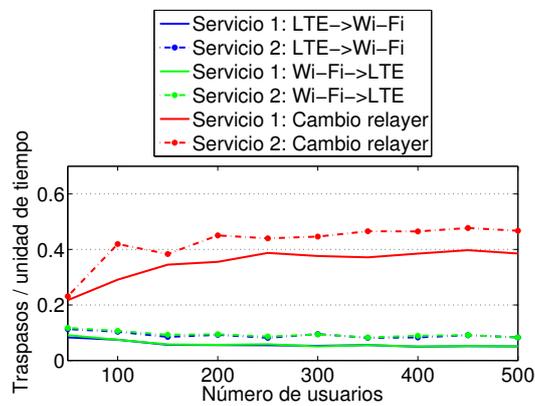


Figura 4.34: Traspasos diferenciados en servicios con  $PT_x=16\text{dB}$

Por último, se comprobará el grado de utilización de los relayers en el escenario para las situaciones en las que el acceso es D2D, representando la Cumulative Distribution Function (CDF) de su ocupación, procesando la información referente a 500 usuarios. Los servicios que se cursan en este escenario son ligeros, por lo que un relayer que siempre utilizase la tasa más alta de transmisión, (con la que al usuario final le llegarían aproximadamente  $21\text{Mb}$ ), estaría completamente ocupado si se conectasen a él 108 usuarios cursando servicios del tipo 1. Por ello (junto con el hecho de que un 60% de los usuarios serán relayer), se necesitaría un número muy alto de usuarios en el sistema para saturarlos, situación que no se produce en los experimentos llevados a cabo.

Teniendo en cuenta además que no siempre va a ser más rentable en términos de potencia la conexión mediante D2D, se necesitarían aún más usuarios para llegar a la saturación, por lo que es más probable que se sature la estación base antes de que los relayers se encuentren en una situación de congestión.

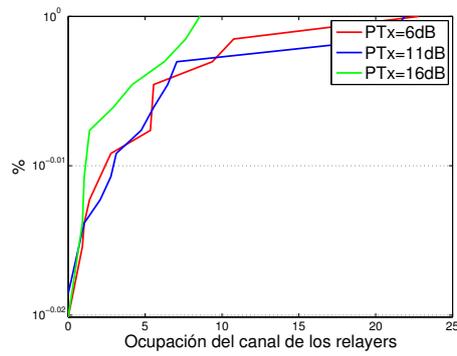


Figura 4.35: CDF del grado de ocupación de los relayers

Se representa la CDF correspondiente a las tres potencias de transmisión en la Figura 4.35, observándose un grado de ocupación muy bajo.

## Capítulo 5

# Conclusiones

Mediante este trabajo se ha querido demostrar que es posible la implementación de una herramienta de simulación de escenarios de red celular, sobre un entorno C++, que combine técnicas device-to-device con LTE.

A lo largo del trabajo se han implementado dos tipos de escenarios, para comprobar el funcionamiento de las técnicas D2D o de una conexión directa LTE en diferentes situaciones. El primero de ellos, de prueba, se utilizó para comprobar que la herramienta se comportaba según lo previsto en el modelo teórico realizado en Matlab, generado a partir de las posibles SINR de los usuarios (relay y cliente) y de la potencia necesaria para llevar a cabo los distintos tipos de conexión. Luego, se ha analizado el comportamiento de la herramienta para un escenario más complejo, tal y como se ha detallado en la segunda mitad del capítulo de resultados, en el que se comprueba que lo obtenido aplicando un criterio de conexión D2D sensiblemente mejor que cuando no se aplica, en todos los aspectos estudiados, a excepción del comportamiento de los traspasos.

Entre los resultados obtenidos se puede destacar el comportamiento de los servicios, ya que se ha comprobado que se comportan de diferente manera, dependiendo de la duración. Cuanto mayor sea, mejor comportamiento tendrá la conexión mediante criterio D2D. Este rendimiento, a su vez, también depende de la potencia de transmisión de la antena, y del número de usuarios en el escenario. Se concluye que a mayor potencia de transmisión, mejores serán las condiciones del canal, y un mayor número de servicios finalizan satisfactoriamente de una manera genérica. Por otra parte, cuando se aumenta el número de usuarios, es más probable tener un usuario relay que ofrezca conexión Wi-Fi bajo buenas condiciones de canal. Al contrario, cuando se cambia la configuración, y se aplica un criterio de única conexión de conexión únicamente mediante LTE, el rendimiento queda perjudicado, porque al haber más usuarios la estación base llega a saturarse. En estas condiciones, cuando la estación está al borde de la saturación, siempre se comportará mejor un servicio ligero que uno pesado, porque esa diferencia entre servicios, puede significar la aceptación o no del mismo.

Mediante el estudio del comportamiento de los servicios bajo ambas opciones, se obtuvo éstos no se ven perjudicados, es más mejoran, con la utilización del criterio de conexión D2D. Además, se consideró interesante saber en qué momento de la conexión se rechazaron los servicios, obteniendo esa métrica del número medio de ite-

raciones en que se encuentra activo realmente el servicio respecto a su duración. Aquí también se obtuvieron resultados favorables a la opción con criterio D2D, porque los servicios se encuentran en media más tiempo activos que cuando se aplica únicamente la conexión directa LTE.

Además se ha analizado el throughput de los recursos y la potencia de la estación base, estudiando el tráfico que cursa en cada iteración, respecto a los recursos que se están utilizando. Este resultado proporciona consideraciones muy interesantes respecto a las dos opciones de conexión, concluyéndose que a medida que el escenario tiene un mayor número de usuarios, el comportamiento con LTE queda absolutamente perjudicado, debido a que la estación base llega a saturarse, mientras que al emplear D2D ocurre el efecto opuesto, como es más probable encontrar usuarios cercanos con buenas condiciones de canal, el número de recursos utilizados se mantiene bajo, aunque incrementa el número de usuarios (15 % para la configuración con mayor número de usuarios).

La única consideración que resulta perjudicial para las conexiones mediante criterio D2D respecto a una conexión directa LTE, son los traspasos, que aumentan, en concreto los horizontales, a medida que los escenarios son más densos. Este comportamiento es lógico, debido a que el número de relayers en el escenario también aumenta, por lo cual se encuentra un mayor número de opciones de conexión Wi-Fi. Se ha planteado una solución que, pese a no ser óptima, reduce en un 5 % ese número de traspasos, que podría perjudicar la calidad de servicio de los usuarios.

Después del estudio realizado en este trabajo, se concluye que esta tecnología podría aplicarse en sistemas del mundo real en un futuro no muy lejano, como técnica de acceso, tanto en 4G como en 5G. Aún así, se considera el D2D como una tecnología con una madurez insuficiente como para implementarse en la actualidad, debido a que se encuentra en periodo de definición, tanto su modo de trabajo, como su tecnología base, aunque en este trabajo se haya decidido utilizar Wi-Fi por su gran potencial y expansión.

Se prevee, para un futuro, redes 5G en las que se integrarán en el acceso todas las tecnologías existentes dando lugar a escenarios con comunicaciones masivas entre dispositivos que sean a la vez muy fiables. Con el 5G se pretende conseguir un aumento de entre 10 y 100 veces la tasa típica de usuario en la actualidad, multiplicándose por 1000 el volumen de tráfico que se genera en un área concreta; además crecerá notablemente el número de dispositivos conectados a la red, y su latencia se reducirá en un factor de 5. La arquitectura 5G, estará caracterizada por la convivencia de distintos tamaños de celda, tecnologías de acceso y nuevas técnicas complementarias tales como CoMP, D2D o DuDe.

A raíz de la investigación desarrollada en este trabajo surgen líneas futuras de desarrollo. Como función adicional que podría ser añadida a la herramienta implementada destacan las técnicas existentes para acometer la optimización de la red, logrando así un balanceo del tráfico para minimizar el número de usuarios sin cobertura y la potencia transmitida tanto por las estaciones base como por los relayers. Los algoritmos de optimización se relacionan con problemas NP, los cuales no pueden ser resueltos

eficientemente; sin embargo pequeñas instancias sí que podrían tener solución aproximada mediante algoritmos de optimización. Junto con la optimización del escenario planteado, se podrían realizar diferentes configuraciones de red, con otro número de estaciones y usuarios, en los que se pueda considerar interesante la utilización de estas técnicas, como en situaciones en el borde de las celdas.

# **ANEXOS**

## **Anexo A**

# **Resultados evitando traspasos**

Se presentan los resultados en los cuales se trata de evitar traspasos, los cuales, contabilizan el número de servicios exitosos, tirados y rechazados según el tipo de servicio y la potencia de transmisión de la antena en la Figura A.1

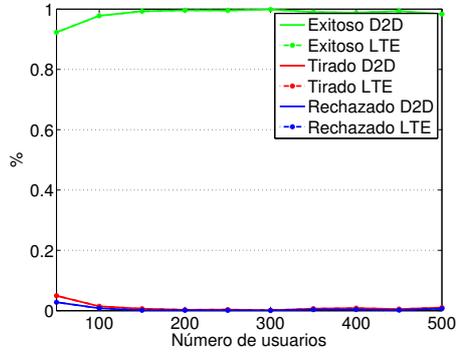
En los resultados de las Figuras A.2 y A.3 se plantea el porcentaje de tiempo que se encuentra activo el servicio, respecto al que debería de haberlo estado, según la información que se encuentra en las trazas.

En las Figuras A.4, A.5 y A.6 se presenta la potencia media consumida en media por los usuarios a lo largo de la hora cargada.

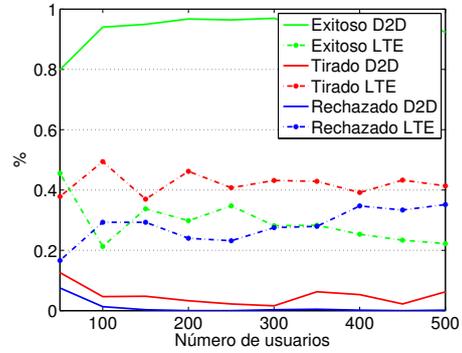
En las Figuras A.7, A.8 y A.9 se representa el tráfico cursado en media por las estaciones base a lo largo de la hora cargada. Y la eficiencia de la potencia según el tráfico cursado en las Figuras A.10, A.11 y A.12.

En las Figuras A.13, A.14 y A.15 se presenta la media de los recursos totales de la estación base consumidos por los usuarios a lo largo de la hora cargada, y a continuación en la Figura A.16 se presenta la eficiencia media de los recursos según el tráfico que se cursa.

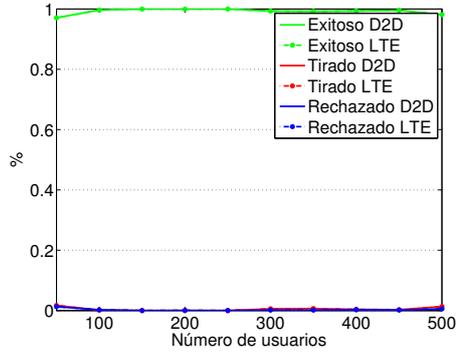
Como los valores medios no dan demasiada información se presenta en las Figuras A.17, A.18 y A.19 la eficiencia en función de la potencia y de los recursos consumidos por los usuarios a lo largo de la hora cargada en una de las repeticiones para tres números diferentes de usuarios: 50, 250 y 450.



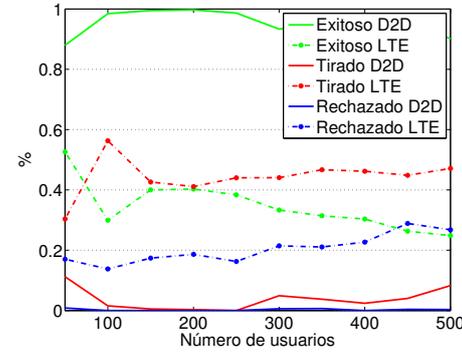
(a) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 6dB



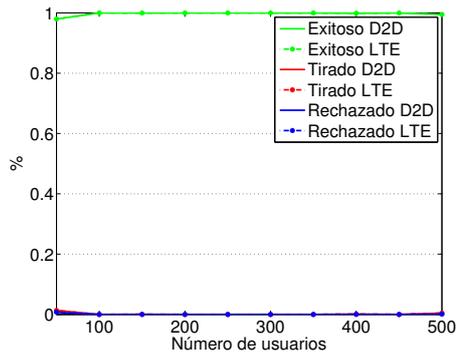
(b) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 6dB



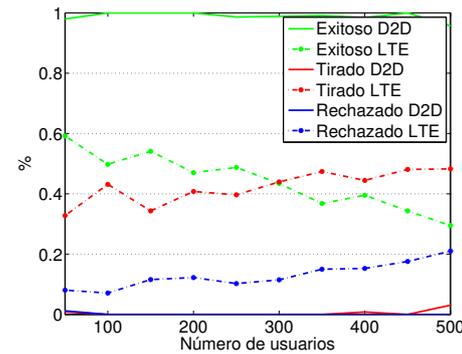
(c) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 11dB



(d) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 11dB



(e) Servicios tipo 1, para potencia de transmisión 16dB



(f) Servicios tipo 2, para potencia de transmisión 16dB

Figura A.1: Comportamiento de los servicios

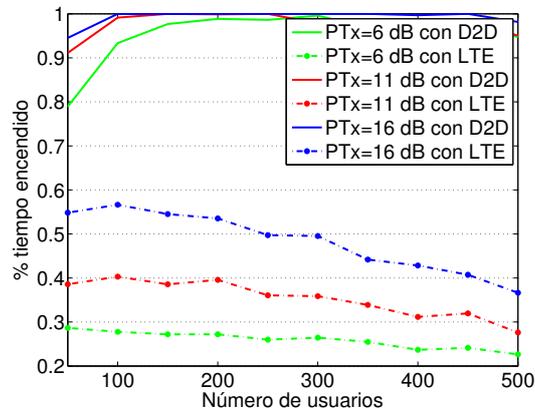


Figura A.2: Tiempo para el servicio 1

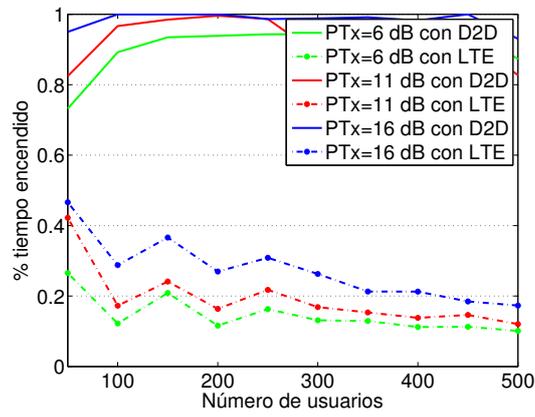


Figura A.3: Tiempo para el servicio 2

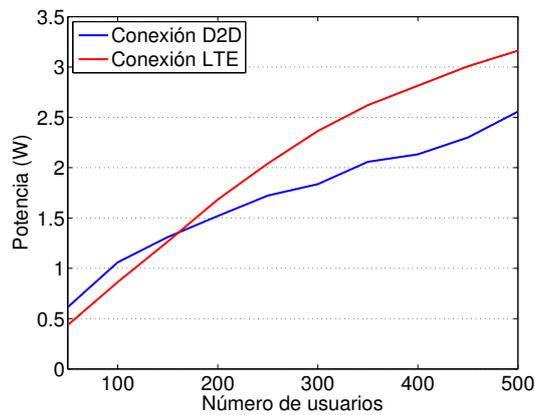


Figura A.4: Potencia media consumida por los usuarios para PTx=6dB

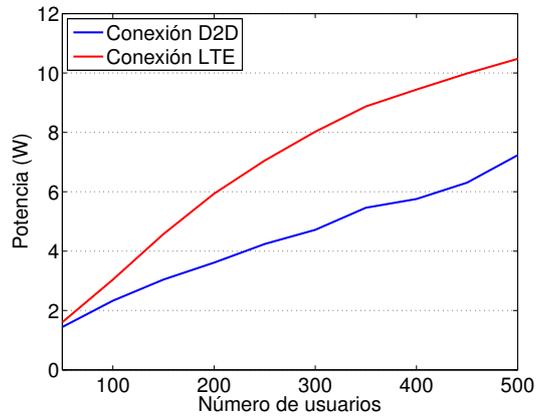


Figura A.5: Potencia media consumida por los usuarios para  $P_{Tx}=11\text{dB}$

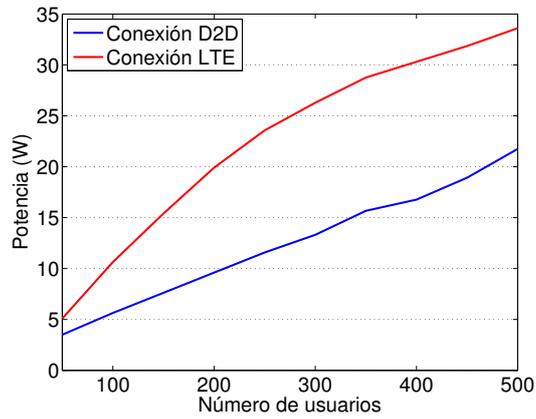


Figura A.6: Potencia media consumida por los usuarios para  $P_{Tx}=16\text{dB}$

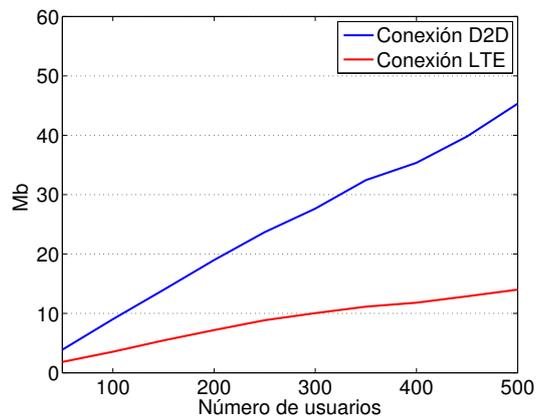


Figura A.7: Tráfico cursado para potencia de transmisión 6dB

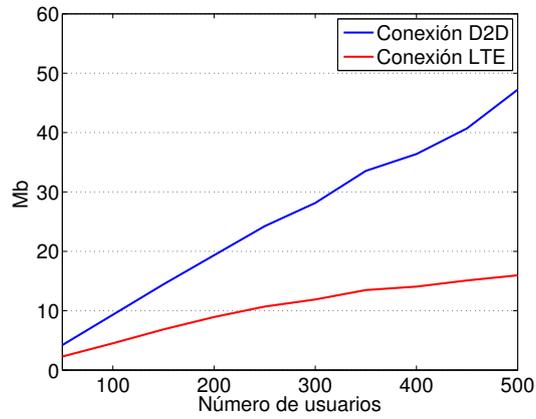


Figura A.8: Tráfico cursado para potencia de transmisión 11dB

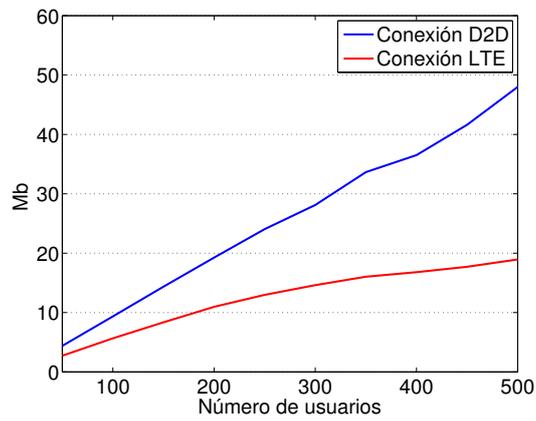


Figura A.9: Tráfico cursado para potencia de transmisión 16dB

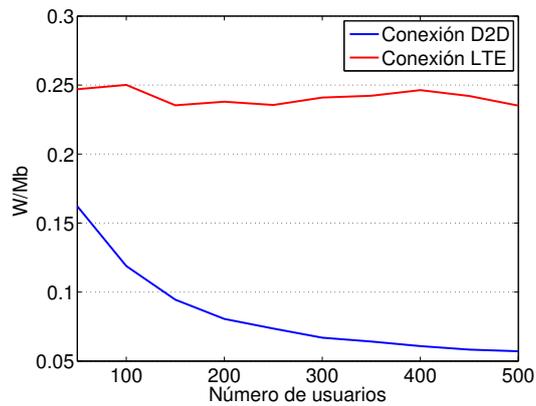


Figura A.10: Potencia media según el tráfico cursado para  $PT_x=6dB$

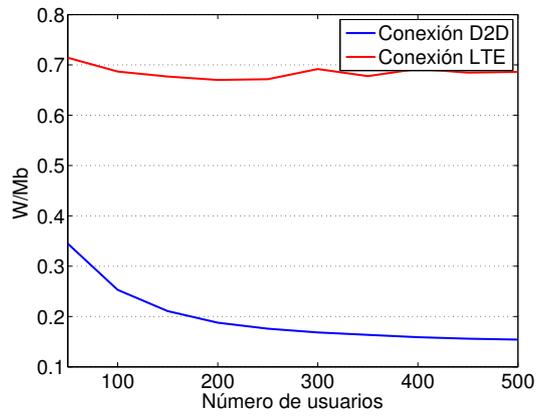


Figura A.11: Potencia media según el tráfico cursado para  $PT_x=11\text{dB}$

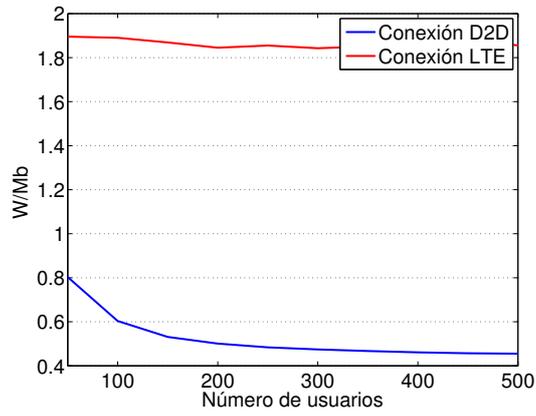


Figura A.12: Potencia media según el tráfico cursado para  $PT_x=16\text{dB}$

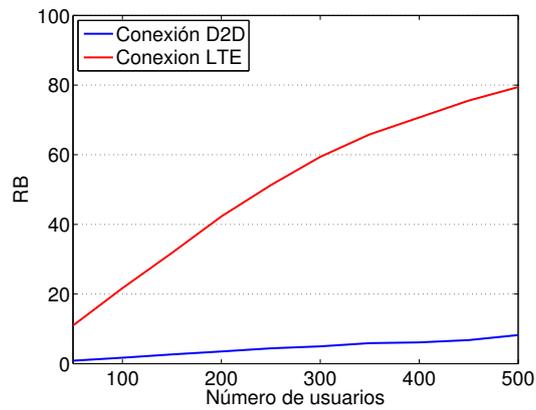


Figura A.13: Resource blocks utilizados para  $PT_x=6\text{dB}$

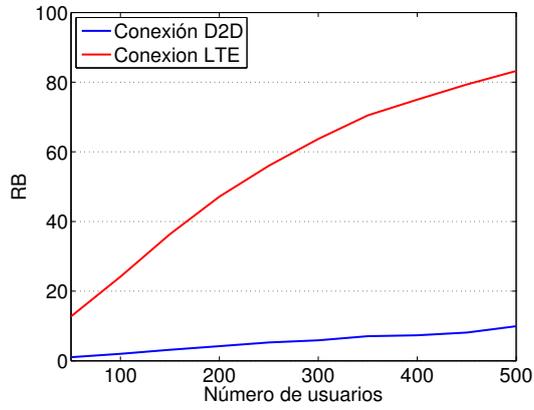


Figura A.14: Resource blocks utilizados para PTx=11dB

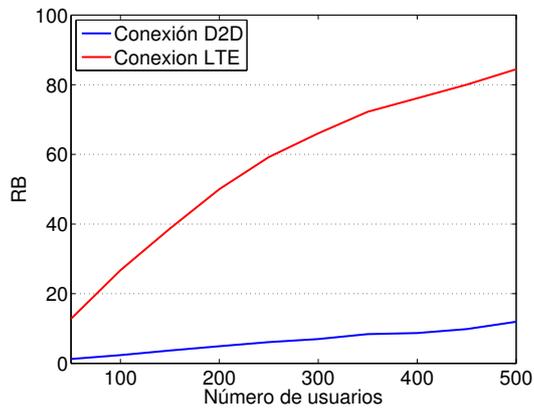


Figura A.15: Resource blocks utilizados para PTx=16dB

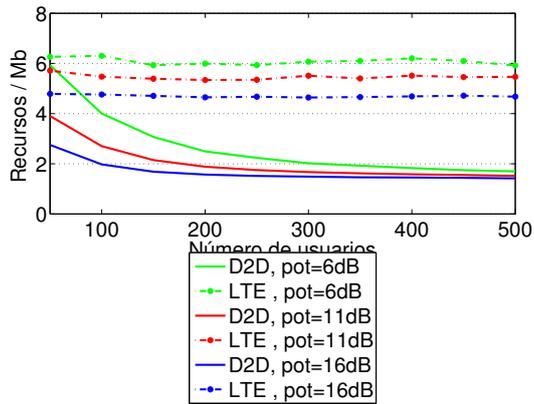


Figura A.16: Resource blocks / tráfico cursado

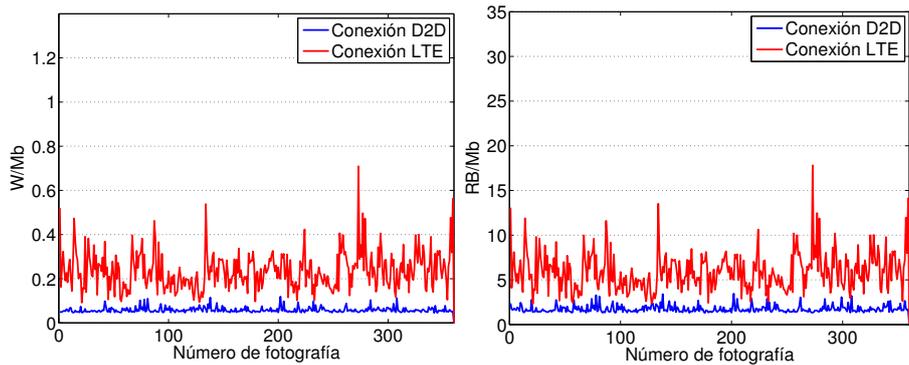
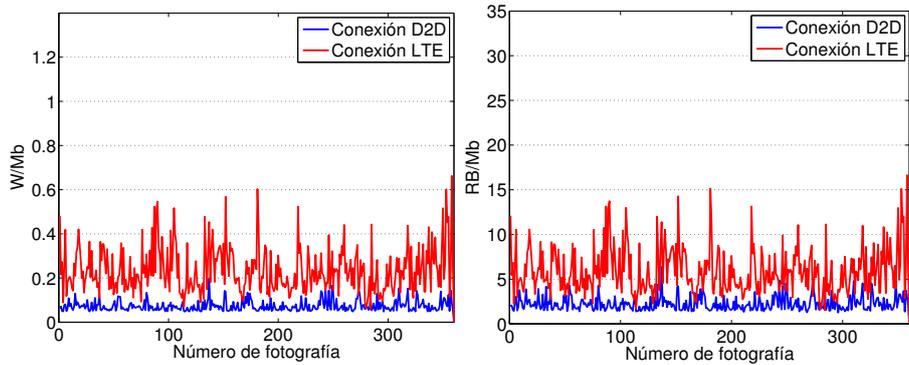
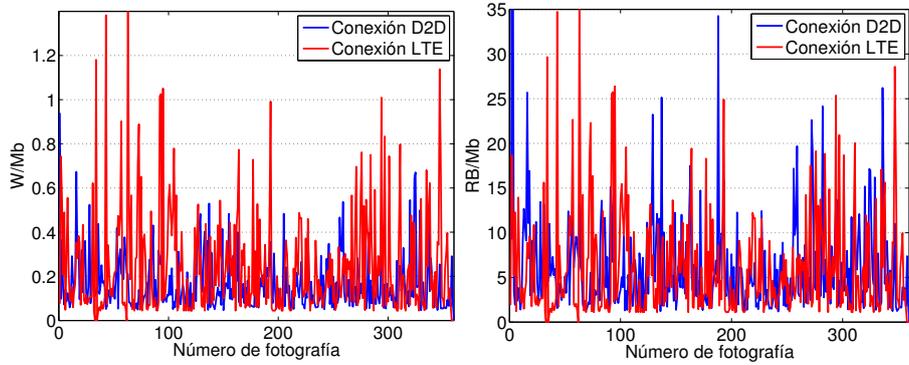
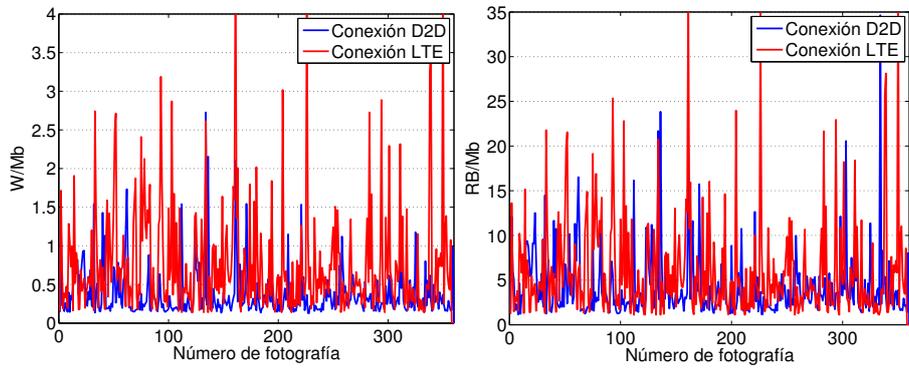
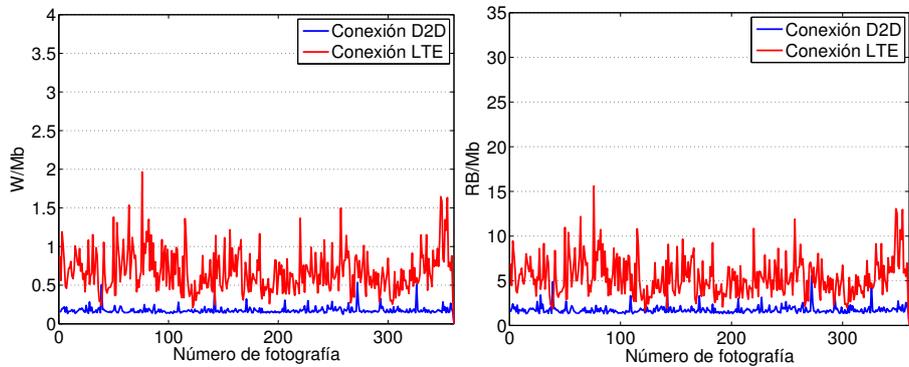


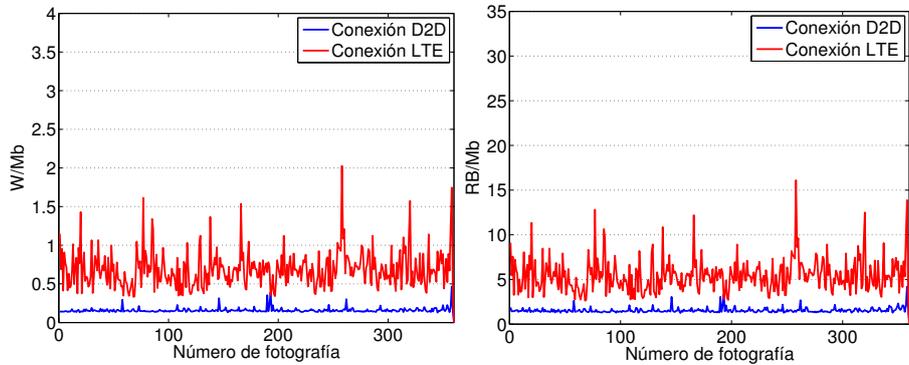
Figura A.17: Medidas en la hora cargada para  $P_{Tx}=6\text{dB}$



(a) Eficiencia de la potencia para 50 usuarios (b) Eficiencia de los recursos para 50 usuarios

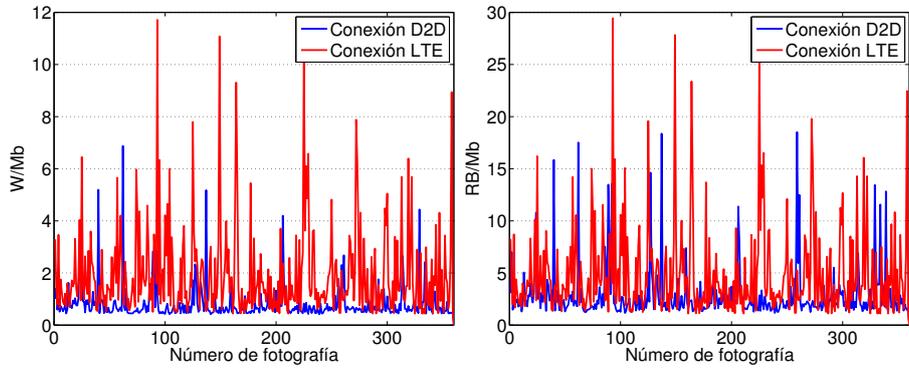


(c) Eficiencia de la potencia para 250 usuarios (d) Eficiencia de los recursos para 250 usuarios

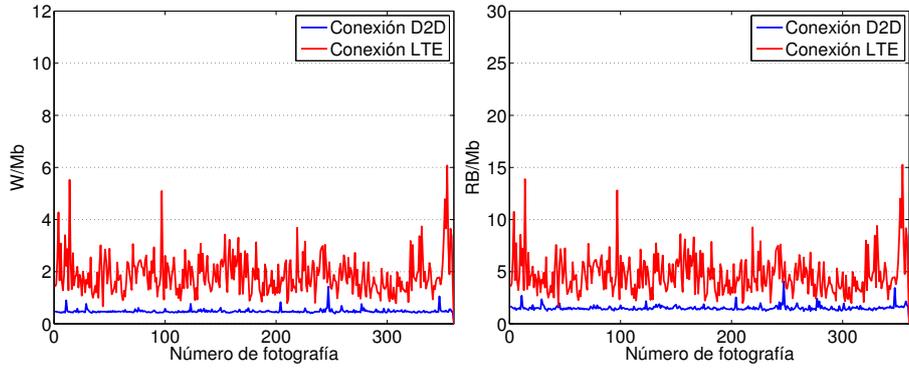


(e) Eficiencia de la potencia para 450 usuarios (f) Eficiencia de los recursos para 450 usuarios

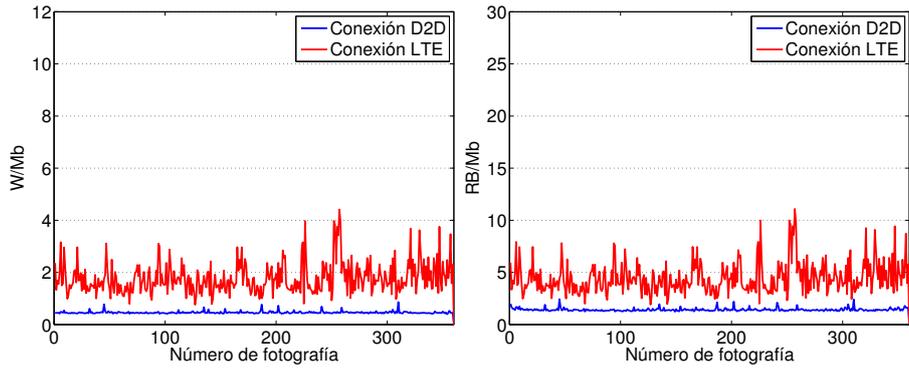
Figura A.18: Medidas en la hora cargada para  $P_{Tx}=11\text{dB}$



(a) Eficiencia de la potencia para 50 usuarios (b) Eficiencia de los recursos para 50 usuarios



(c) Eficiencia de la potencia para 250 usuarios (d) Eficiencia de los recursos para 250 usuarios



(e) Eficiencia de la potencia para 450 usuarios (f) Eficiencia de los recursos para 450 usuarios

Figura A.19: Medidas en la hora cargada para  $PT_x=16\text{dB}$

## Bibliografía

- [1] Arash Asadi, Qing Wang, and Vincenzo Mancuso. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, PP(99):1–1, 2014.
- [2] Atel Asesores, Long Term Evolution, L T E Prof, and Atel Asesores. Capítulo 3 Acceso Múltiple OFDMA. pages 1–102.
- [3] Comunicaciones Industriales Avanzadas. Redes móviles terrestres: 4g. pages 1–12, 2010.
- [4] Baldomero Coll-Perales, Javier Gozalvez, and Joaquin Sanchez-Soriano. Empirical performance models for P2P and two hops multi-hop cellular networks with mobile relays. *Proceedings of the 8th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks - PM2HW2N '13*, pages 21–28, 2013.
- [5] Etsi. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 11.0.0 Release 11). 0:1–111, 2012.
- [6] Javier Gozalvez and Baldomero Coll-Perales. Experimental evaluation of multi-hop cellular networks using mobile relays. *IEEE Communications Magazine*, 51(7):122–129, 2013.
- [7] Telesystem Innovations. LTE in a Nutshell. *White Paper*, 2010.
- [8] Peng Li and Song Guo. Incentive Mechanisms for Device-to-Device Communications. (August):75–79, 2015.
- [9] Xingqin Lin, Jeffrey G Andrews, Amitabha Ghosh, and Rapeepat Ratasuk. An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services. (April):40–48, 2014.
- [10] Jiajia Liu, Shangwei Zhang, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Kenichi Suzuki. Device-to-Device Communications for Enhancing Quality of Experience in Software Defined Multi-Tier LTE-A Networks. (August):46–52, 2015.
- [11] Preben Mogensen, Wei Na, István Z. Kovács, Frank Frederiksen, Akhilesh Pokhariyal, Klaus I. Pedersen, Troels Kolding, Klaus Hugl, and Markku Kuusela. LTE capacity compared to the shannon bound. *IEEE Vehicular Technology Conference*, (1):1234–1238, 2007.
- [12] Wirth, T., Venkatkumar, V., Haustein, T., Schulz, E., , and R Halfmann. LTE-Advanced Relaying for Outdoor Range Extension. pages 20–23, 2009.