Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

"Diseño de una simulación en MATLAB para el análisis del desempeño de una red OFDMA"

T E S I S

Presentada para obtener el título de:

Licenciatura en Electrónica

Presenta:

Olivia Guerrero Méndez

Asesora:

Dra. Josefina Castañeda Camacho

Co-asesora:

Dra. Liliana Cortez

Puebla, Pue. Abril 2016

Dedico esta tesis a mi familia, a mis padres Luz María y Gerardo y a mis hermanos Luis Alberto y Gerardo.

Agradecimientos

Agradezco a mis asesoras de tesis, Dra. Josefina Castañeda Camacho y Dra. Liliana Cortez, por todo el tiempo dedicado a la realización de este trabajo, por la paciencia y apoyo en todas las actividades relacionadas a este trabajo de tesis.

También agradezco a mis sinodales, M.I. Rubisel Tovilla Heredia, Lic. Ángel Juárez Palacios y Dra. Susana Sánchez Urrieta por sus observaciones para mejorar este trabajo.

Agradezco a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos que siempre me han apoyado.

Índice general

Introducción ix

Objetivos x

1. Introducción a la telefonía móvil 1
1.1. Principios de Sistemas Celulares 2
1.2. Generaciones de la telefonía móvil 4
1.2.1. Primera Generación-1G 4
1.2.2. Segunda Generación-2G 5
1.2.3. Tercera Generación-3G 6
1.2.4. Cuarta Generación-4G 7
1.2.5. Quinta Generación-5G 10
1.3. Introducción a los esquemas de acceso de la telefonía móvil . . 12
1.3.1. CDMA (Code Division Multiple Access) 12
1.3.2. TDMA (*"Time Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Tiempo) 14
1.3.3. OFDM (*"Orthogonal Frequency Division Multiplexing"*, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) 15
1.3.4. FDMA (*"Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencia) 16
1.3.5. OFDMA ("Orthogonal Frequency Division Multiple Access", Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) 16

2. Funcionamiento y principios de OFDMA 19
2.1. Características y Efectos del canal OFDMA 19
2.1.1. Pérdidas por trayecto (Path loss) 19

2.1.2. Desvanecimientos lentos u Oscurecimientos (*Slow fading o shadowing*) . . . 20
2.1.3. Desvanecimientos rápidos (*fast fading*) . . . 21
2.1.4. Fenómeno Doppler . . . 21
2.2. Estándar IEEE 802.16 . . . 22
2.2.1. Evolución del estándar IEEE 802.16 . . . 22
2.2.2. Capas de protocolos . . . 23
2.2.3. Capa física (PHY) . . . 23
2.2.4. Subcanalización . . . 25
2.2.5. Capa MAC . . . 25
2.2.6. Tipos de topología . . . 27
2.3. Transmisor OFDMA . . . 27
2.4. Receptor OFDMA . . . 30
2.5. OFDMA: Forma de operación . . . 31

3. Elementos para la evaluación del desempeño en redes OFDMA 35
3.1. SIR (Signal to Interference Ratio) . . . 35
3.2. Interferencia . . . 36
3.3. Relación Energía a Interferencia E_b/I_0 . . . 37
3.4. Tasa de transmisión R_i y Desempeño (*Throughput*) . . . 37
3.5. Modulaciones Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM . . . 38
3.6. Reutilización en frecuencia . . . 39
3.7. Parámetros básicos de antenas . . . 40
3.7.1. Antenas sectoriales . . . 42

4. Modelado y construcción de la plataforma de evaluación del desempeño de la red OFDMA en MATLAB 43
4.1. Modelo de la red celular . . . 45
4.2. Implementación de las ecuaciones de la red OFDMA . . . 46
4.2.1. E_b/I_0 . . . 47
4.2.2. Tasa de transmisión . . . 47
4.2.3. SIR . . . 48
4.2.4. Ganancia de la antena . . . 49
4.2.5. Patrones de reutilización de frecuencia utilizados . . . 50

5. Resultados y conclusiones **63**
5.1. Resultados 63
5.2. Conclusiones 74

Bibliografía **78**

A. Código en MATLAB **83**

Introducción

La telefonía móvil es un área que se encuentra en constante desarrollo, actualmente se acepta la existencia de 4 generaciones de comunicaciones móviles, aunque ya se habla de una quinta generación que surgirá proximamente.

Las comunicaciones móviles avanzan a pasos agigantados, pues al hacer una comparación entre las diferentes generaciones existentes se puede ver que la primera generación ofrecía exclusivamente el servicio de voz, y actualmente la telefonía móvil ofrece muchos más servicios como datos, audio y video, entre otros; los cuales cada vez son perfeccionados para adaptarse a las necesidades de los usuarios [1, 2].

La cuarta generación de los sistemas celulares ofrece características para el desarrollo de una comunicación sin interrupciones, algunas de estas características son: velocidades mayores a 2 Mbps, telepresencia, seguridad, acceso multisistemas, terminales multimodo y multifunción. Está basada en OFDMA, técnica de acceso múltiple que presenta ventajas significativas en términos de eficiencia espectral, robustez frente al desvanecimiento de canales multitrayecto, resistencia a interferencia multiusuario, entre otras [3].

Es de gran importancia el uso eficiente de los recursos para lograr la maximización de la capacidad del sistema, por lo que esto se convierte en un problema importante dentro del diseño de redes celulares [3].

Este tema de tesis aborda el desempeño de un sistema celular OFDMA (*"Orthogonal Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) en términos del *throughput*, tasa de bits y SIR (Relación Señal a Ruido), por medio de una simulación de eventos discretos Monte Carlo.

El trabajo de tesis está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 1, se hace una revisión de las diferentes generaciones de telefonía móvil así como de los diferentes esquemas de acceso; el Capítulo 2 se enfoca a las características de OFDMA; en el Capítulo 3 se presentan los elementos que se requieren para el análisis del sistema, en el Capítulo 4 se encuentra el modelado de la simulación que se realizó en MATLAB y finalmente en el Capítulo 5 se encuentran los resultados y conclusiones que se obtuvieron con la simulación.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el desempeño de una red OFDMA mediante el diseño de una simulación en MATLAB

Objetivos Particulares

1. Estudiar el estado del arte del tópico, los principios de funcionamiento de las redes OFDMA y las normas que las regulan
2. Analizar y estudiar la forma de operación y medición del desempeño en redes de comunicación OFDMA.
3. Determinar los parámetros básicos que se consideran en la evaluación del desempeño de una red OFDMA.
4. Estudiar el estándar que regula la operación de las redes OFDMA.
5. Diseñar una simulación de eventos discretos basada en la metodología Monte Carlo que permita evaluar el desempeño de una red OFDMA, en términos de *throughput*, tasa de bits y SIR.
6. Validar los resultados obtenidos de la simulación con los reportados en la literatura.

Capítulo 1

Introducción a la telefonía móvil

Los telefónos celulares se han convertido en una herramienta muy utilizada, es decir; el número de usuarios se ha ido incrementando de manera importante, en el mundo en el año 2013 había un estimado de 4 billones de usuarios, para 2016 se espera un total de 4.61 billones de usuarios, esta cifra continuará en aumento de tal forma que para el año 2019 se espera un total de 5 billones de usuarios aproximadamente [4], mientras que en México se reportaron en el año 2015 un estimado de 100 millones de usuarios **??**; todo esto debido a que como ya se mencionó cada vez ofrecen más y mejores servicios, lo que permite al usuario el acceso a diferentes aplicaciones en casi cualquier momento y lugar.

Uno de los factores más importantes dentro de la telefonía móvil es la compatibilidad; existen diferentes tecnologías de acceso las cuales permiten al usuario acceder a la red en diferentes formas de acuerdo a la tecnología empleada. Cada tecnología tiene sus propias características que definen el funcionamiento y operación de cada una de ellas.

En este primer capítulo se hará una descripción de las diferentes generaciones existentes de la telefonía móvil además de las expectativas para las próximas generaciones. También se incluyen los esquemas de acceso que han sido utilizado por las generaciones de telefonía móvil.

1.1. Principios de Sistemas Celulares

En los sistemas celulares, el área de servicio es dividida en subregiones o subáreas de cobertura denominadas celdas. Cada una de estas celdas es atendida por una antena. En una red celular a cada celda se le asigna una banda de frecuencias y cada una de ellas es atendida por una estación base, la cual está integrada por un transmisor, un receptor y una unidad de control [6].

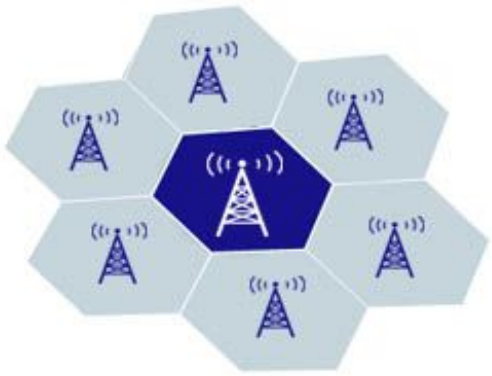

Figura 1.1: Ejemplos de celdas.

A las celdas adyacentes se les asignan frecuencias a fin de evitar la interferencia cocanal, sin embargo si las celdas están lo suficientemente separadas, estas pueden utlizar las mismas frecuencias.

Los sistemas móviles celulares fueron diseñados para ofrecer servicios de transmisión de voz y datos a usuarios sin la necesidad de que exista una conexión física lo que implica una gran libertad de movimiento dentro de una región de cobertura.

El diseño de sistemas celulares debe considerar los sisguientes aspectos:

- **Configuración del área de cobertura:** celdas hexagonales, se eligió la forma de hexágono porque proporciona la transmisión más efectiva aproximada a un patrón circular, mientras elimina espacios presentes entre los círculos adyacentes. Una célula se define por su tamaño físico y, lo más importante, por el tamaño de su población y patrones de tráfico. El número de células por sistema es definido por el proveedor, de acuerdo a patrones de tráfico anticipados. Cada área geográfica del

servicio móvil se distribuye en canales de radio celular. Cada transmisor/receptor con un área envolvente tiene un subconjunto fijo de canales de radio disponibles, basados en el flujo de tráfico anticipado [6, 7].

- **Asignación de servicio:** Estación base/Usuario móvil, Enlace ascendente y enlace descendente. Existen dos tipos de enlace, el que va de estación base a usuario móvil que es denominado enlace descendente (*downlink*) y el enlace que va de usuario móvil a estación base que se conoce como enlace ascendente (*uplink*) [6, 7].

- **Reuso de frecuencia:** En un sistema celular, cada celda tiene una estación base trans-receptor. El reuso de frecuencia tiene por objeto la distribución de la banda de frecuencia de un sistema celular de tal forma que dos celdas no se interfieran una a la otra. Cada canal de radio consta de un par de frecuencias que operan en modo full-duplex. Un canal de radio en particular, F_1, empleado en una celda C_1 de radio R, puede ser utilizado en otra celda C_1 también de radio R pero ubicada a una distancia D de la original. El reuso de frecuencia es un concepto central dentro de los sistemas celulares móviles [6, 7].

Un sistema celular está conformado por los siguientes elementos:

- **Estación base (BS):** La estación base (BS) incluye la antena, un controlador y un número de tranceptores. El controlador se utiliza para mantener la comunicación entre la unidad móvil y el resto de la red. En cualquier instante un número de unidades móviles se encuentran activas dentro de una celda a través de la BS. Una estación base sirve como un control central para todos los usuarios dentro de esa celda. Las unidades móviles se comunican directamente con la estación base, la cual sirve como una estación retransmisora de potencia. Las unidades móviles transmiten a la estación base y la estación base emite esas transmisiones a una potencia mayor. La estación base puede mejorar la calidad de la transmisión, pero no puede incrementar la capacidad de canales, dentro del ancho de banda fijo de la red.

- **MTSO:** Cada estación base e conecta con la oficina de conmutación del sistema móvil. El MTSO realiza el proceso de conexión de llamadas entre unidades móviles. Esta entidad también se encarga de conectar a los usuarios celulares con la red telefónica pública. El MTSO asigna

los canales de voz a cada llamada, controla el procedimiento de transferencia de llamada y monitorea la llamada para fines de facturación.

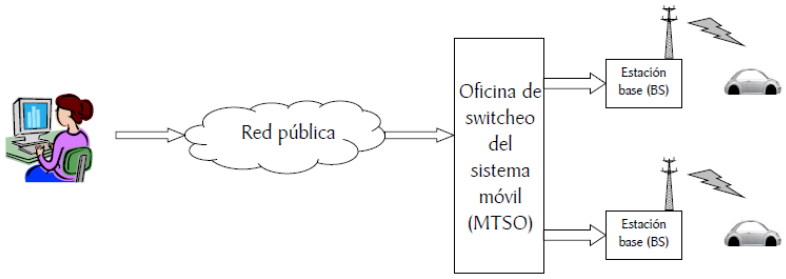

Figura 1.2: Elementos de una red celular.

1.2. Generaciones de la telefonía móvil

En esta sección se explicará cada una de las generaciones que existen, desde la primera generación hasta la cuarta, que son las que hasta el momento ya existen de manera formal; adicionalmente se explicarán las características y expectativas de la quinta generación que todavía se encuentra en desarrollo.

1.2.1. Primera Generación-1G

La primera generación de telefonía celular móvil comenzó a funcionar a principios de los años ochenta, su característica principal es que utilizaba esquemas de modulación analógicos para la transmisión de voz [6].

Los sistemas móviles de esta generación se caracterizaban por realizar la transmisión análogica de voz con baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios, utilizaba para su funcionamiento la Técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), por lo que estos sistemas estaban limitados en relación al número de usuarios a los que podían dar servicio [7].

El primer sistema celular analógico comercial comenzó a operar en Japón en el año de 1979 y fue desarrollado por la compañia de Telefonía y Telegrafía de Japón (NTT).

En el año de 1981 aparece el sistema *"Nordic Mobile Telephone System"* NMTS450 y comenzó a funcionar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en la banda de 450 MHz. En tanto que en

En Estados Unidos se comenzó a utilizar el sistema AMPS ("Advanced Mobile Phone Service") en el año de 1983, operaba en la banda de los 800 MHz y ofrecía un total de 666 canales, 624 canales para voz y 42 canales para señalización.

En 1985 en Gran Bretaña se adoptó el sistema conocido como TACS (*"Total Access Communications System"*), dicho sistema contaba con un total de 1000 canales de 25 KHz cada uno y operaba en la banda de 900 MHz

Así durante la década de 1980 aparecieron otros sistemas de primera generación por ejemplo el estándar Alemán *C-Netz* y el francés *French Radiocom 2000* y otros más.

1.2.2. Segunda Generación-2G

La segunda generación de telefonía móvil (2G) comenzó aproximadamente en el año de 1990, esta generación se diferencia de la la anterior porque es digital, con lo que se lograron reducciones en cuanto a tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, además introdujo nuevos servicios como los SMS (Short Message Service) e identificador de llamadas.

Se logró una velocidad de 9.6 kbit/s, velocidad que es más alta respecto a 1G pero que aún es muy limitada para la comunicación de datos. También se tuvieron avances significativos en términos de seguridad, calidad de voz y *roaming* (capacidad de cambiar de un área de cobertura a otra sin interrupción en el servicio o pérdida en conectividad) [8, 7].

Las tecnologías predominantes desarrolladas para esta generación están basadas en GSM (*"Global System for Mobile Communications*"), TDMA IS-136, CDMA IS-95 (*"Code Division Multiple Access"*) [7].

Continuando con el desarrollo de 2G surgió lo que se conoce como 2.5G, esta generación ofrece servicios de navegación por Internet aunque de manera

muy limitada (solo texto y sin formato); esto permitió que muchos proveedores de servicios de telecomunicaciones hayan evolucionado hacia las redes 2.5G antes de entrar por completo a las redes 3G. Como dato importante cabe mencionar que Europa y Estados Unidos migraron a 2.5G en año 2001 mientras que Japón fue directo de 2G a 3G también en el 2001 [7].

Los sistemas de la generación 2.5G están basados en GPRS (*"General Packet Radio System"*), HSCSD (*"High Speed Circuit Switched Data"*), EDGE (*"Enhanced Data Rates for Global Evolution"*), IS-136B, IS-95B, entre otros y se alcanzan velocidades de hasta 384 kbits/s.

1.2.3. Tercera Generación-3G

La 3G se caracteriza por la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en este tipo de sistemas soportan velocidades más altas de información y están enfocados no solo en aplicaciones de voz, sino además audio (MP3), video en movimiento, videoconferencia y acceso rápido a Internet, por nombrar algunos [7].

Los sistemas de esta generación están basados en: UMTS (*"Universal Mobile Telephone Service"*), CDMA2000, IMT-2000, ARIB(3GPP), UWC-136, entre otras [7].

La telefonía UMTS es el núcleo de la telefonía móvil de tercera generación (3G) en la nomenclatura de los operadores telefónicos, pues proporciona a los usuarios una comunicación relativamente eficiente y fácil de utilizar en comparación con las generaciones anteriores, algunos de los servicios que ofrece se mencionan a continuación [9]:

- Transmisión simétrica y asimétrica relativamente confiable.
- Velocidades de 384kbps en espacios abiertos y de hasta 2 Mbps para usuarios con baja movilidad (transeúntes que se desplazan a menos de 10 km/hr)
- Uso de ancho de banda dinámico, ajusta automáticamente el ancho de banda de acuerdo a la aplicación.

- Soporte de conmutación de paquetes y de circuitos.
- Acceso a Internet incluyendo todos sus servicios, como audio y video.
- Diferentes servicios simultáneos por medio de una sola conexión.
- Mayor capacidad y uso eficiente del espectro radioeléctrico, debido al uso de CDMA, SCDMA, etc.
- Cobertura mundial con servicios terrestres y por satélite.

La evolución de los sistemas GSM (sistemas de segunda generación) a UMTS (sistemas de tercera generación) implica ciertos cambios en las técnicas de transmisión así como en los servicios prestados que los operadores móviles han comenzado a transformar.

Es por ello que en los sistemas de tercera generación juega un papel muy importante el foro UMTS, el cual fue creado en el año de 1996 y es un organismo independiente cuya función es desarrollar el estándar UMTS. Éste está definido como un sistema de comunicaciones móviles que ofrece beneficios significativos a los usuarios incluyendo una alta calidad en comparación con las generaciones anteriores y servicios inalámbricos multimedia sobre una red convergente con componentes fijos, celulares y por satélite que suministrará información directamente a los usuarios además de proporcionar acceso a nuevos servicios y aplicaciones. Ofreciendo además comunicaciones personales multimedia independientemente de la localización geográfica [9].

1.2.4. Cuarta Generación-4G

4G pretende consolidar los sistemas para que el usuario tenga un servicio estable y sin interrupciones en cualquier parte del mundo con el mismo dispositivo móvil; además de aumentar la velocidad respecto a las generaciones anteriores, lo que sin duda permitirá mayores servicios y facilidades.

La tecnología 4G fusiona algunas tecnologías y protocolos ya existentes obteniendo como resultado un rendimiento más alto. Está basada completamente en el protocolo IP, de esta manera se dice que es un sistema que

engloba a otros sistemas y una red de redes que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cables y las redes inalámbricas.

Esta tecnología puede ser usada por módems inalámbricos, smartphones y otros dispositivos. La diferencia principal con las generaciones anteriores es la capacidad para proveer velocidades de acceso mayores a los 100 Mbps en movimiento y hasta 1 Gbps en reposo. Manteniendo una calidad de servicio de punto a punto que incluye seguridad y con el mínimo costo posible [10].

A continuación se mencionan las características propias de 4G [10]:

- Compatibilidad de servicios con las redes móviles y las redes fijas.
- Alta calidad en los servicios móviles, respecto a las generaciones anteriores.
- Una gran cobertura y simplicidad del *"roaming"* entre sistemas.
- Sistema de múltiples antenas MIMO (*"Multiple Input Multiple Output"*, Múltiples Entradas Múltiples Salidas).
- Antenas inteligentes, las cuales deben ser capaces de suprimir las señales no deseadas y autoajustar la ganancia, además de incluir algoritmos para el procesamiento de señales.
- Gran capacidad (10 veces más que en 3G) y bajos costos.

Actualmente podemos decir que hay dos tecnologías que desarrollan la cuarta generación de telefonía móvil. Por un lado está WiMAX (*"Worldwide Interoperability for Microwave Access"*, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) y por otro lado está LTE (*"Long Term Evolution"*, Evolución a Largo Plazo).

WiMAX ofrece ventajas significativas en términos de latencia, eficiencia en el uso del espectro de frecuencia de radio y soporte avanzado de antenas, lo que se traduce en un desempeño superior al de las actuales tecnologías de redes inalámbricas [12, 13].

WiMAX es un sistema de comunicación digital inalámbrico definido en el estándar IEEE 802.16 para redes de área metropolitana: MAN (*"Metropolitan Area Network"*). Provee comunicaciones de banda ancha con cobertura

de hasta 50Km para estaciones fijas ó de 5 a 15km para estaciones móviles, de esta manera WiMAX es la primera tecnología de banda ancha móvil basada en IP (*"Internet Protocol"*, Protocolo de Internet) y OFDMA (*"Orthogonal Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) [10, 12].

Aunque con la publicación oficial del estándar 802.16-2004 se asentaron las bases para el despliegue inicial de la nueva tecnología de acceso de banda ancha sin hilos, las expectativas finales de WiMAX van más allá de ser un sistema de tipo ADSL (*"Asymmetric Digital Subscriber Line"*, Línea de Abonado Digital Asimétrica) inalámbrico para entornos urbanos y rurales. Realmente los promotores de este proyecto persiguen la ambiciosa meta de que WiMAX sea la tecnología inalámbrica que unifique el mundo de la telefonía móvil y las redes de datos [13].

Con este objetivo, en diciembre del 2002, fue creado el Grupo de Trabajo IEEE 802.16e para mejorar y optimizar el soporte para la combinación de las capacidades de comunicación tanto fijas como móviles en frecuencias por debajo de los 6 GHz. Mientras tanto en diciembre del 2005 se realizó la ratificación oficial del nuevo estándar WiMAX Móvil (802.16e).

La nueva versión del estándar introduce el soporte de la tecnología SOFDMA (*"Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales Escalable); es una variación de la técnica OFDMA que permite un número variable de ondas subportadoras (128,256,512,2048). Además, IEEE 802.16e ofrece un soporte mejorado de las tecnologías MIMO (*"Multiple Input Multiple Output"*, Múltiples Entradas Múltiples Salidas) y AAS (*"Adaptive Antenna Systems"*, Sistemas de Antenas Adaptivas). También incluye mejoras para la optimización del consumo de energía. De esta manera existe una versión más del estándar 802.16e, la versión 802.16m la cual es una extensión del 802.16 que promete entrega de datos a velocidad teórica de 1 GB. El estándar 802.16m, mejor conocido como WiMAX móvil, es el estándar empleado por las compañías celulares para los servicios 4G [12, 13].

En tanto LTE (*"Long Term Evolution"*, Evolución a Largo Plazo), es una tecnología definida por la organización 3GPP (*"3rd Generation Partnership Project"*) donde participan más de 60 operadores, fabricantes e institutos de investigación para definir dicho estándar. LTE promete a los usuarios un

nuevo nivel en el acceso a la banda ancha móvil. Es importante agregar que LTE-*advanced* (*"Long Term Evolution Advanced"*, Evolución a Largo Plazo Avanzada), es el siguiente paso de LTE como sistema 4G [11].

LTE se encuentra estandarizado por en la versión 8 del 3GPP y LTE-advanced por la versión 10. En cuanto a la arquitectura de red de ambas tecnologías está formada por una red E-UTRAN ("Evolved Terrestrial Radio Access Network"), una arquitectura EPC ("Evolved Packet Core") y una arquitectura IMS ("IP Multimedia Subsystem") [14].

LTE utiliza esquemas de acceso OFDMA e incorpora técnicas avanzadas de antenas MIMO, gracias a estas características y a un ancho de banda máximo de 20 MHz es posible alcanzar velocidades de transmisión teóricas de 100 Mbps de bajada y 50 Mbps de subida; por su parte LTE-*advanced* introduce un nuevo concepto denominado agregación de portadora para utilizar un ancho de banda de 100 MHz, utiliza también la tecnología de acceso OFDMA y técnicas de antena MIMO mejoradas, lo que permite a esta tecnología brindar velocidades de transmisión teóricas que se acercan a 1 Gbps para el enlace descendente y los 500 Mbps para el enlace ascendente [14].

1.2.5. Quinta Generación-5G

La tecnología 5G es un nombre utilizado en diversos documentos y proyectos de investigación para indicar la siguiente etapa más importante de los estándares de comunicación móvil más allá de los estándares actuales 4G. Se espera que la aparición de 5G sea probablemente alrededor del año 2020.

Algunas características que se esperan para 5G son las siguientes [15]:

- 5G es un sistema de comunicación inalámbrico casi sin limitaciones, por lo que es considerado un sistema inalámrico real.
- Añade características como HD TV, lo que permite ver programas de televisión con la claridad de alta definición.
- Es posible el envío de datos mucho más rápido que cualquiera de las generaciones anteriores.

- 5G traerá consigo el llamado "WWWW: *World Wide Wireless Web*", denotado como el mundo real inalámbrico perfecto con el cual no habrá limitaciones de acceso y dificultades en ciertas zonas.
- Versión 6 de protocolo de Internet (IPv6), donde se asigna un dirección IP móvil de acuerdo con la ubicación y red conectada.
- Es un estándar global unificado. Permite que el usuario se pueda conectar simultáneamente a varias tecnologías de acceso inalámbrico. Estas tecnologías pueden ser por ejemplo 2.5G, 3G, 4G ó 5G, WiFi, PAN (*"Personal Area Network"*, Red de Área Personal), o cualquier tecnonología de acceso.
- Ofrece gran resolución así como también un gran ancho de banda bidireccional.
- La tecnología 5G proporciona grandes tasas de transmisión de datos en Gb que soportan alrededor de 65 mil conexiones.
- Permite un manejo remoto con el cual es posible que el usuario pueda obtener una solución mejor y más rápido.
- Los diagnósticos remotos son también una característica de 5G.
- La velocidad de conexión que está proporcionando 5G es arriba de 25Mbps.

Comercialmente hablando se espera que la empresa Samsung ofrezca un equipo 5G para el año 2020, y se dice que será posible alcanzar una velocidad de decenas de Gigabits por segundo, velocidad superior a los 75Mbps alcanzados por el servicio de cuarta generación 4G-LTE [16].

Samsung logró probar con éxito el nuevo servicio 5G utilizando un ancho de banda de 28 GHz para transmitir datos a una velocidad de 1 Gigabit por segundo, algo que hasta el momento nadie había anunciado. Se logró que el dispositivo intercambiara señales en tiempo real bajo su nueva plataforma 5G, un avance que servirá para poner en marcha este nuevo servicio a partir de 2020 [16].

Con este logro Samsung toma ventaja en el desarrollo de la tecnología 5G, y se convierte en líder en el mercado de las telecomunicaciones móviles.

Cabe mencionar que en 2013, la Comisión Europea anunció una inversión de 50 millones de euros para lograr impulsar esta tecnología móvil de quinta generación con la intención de situar a Europa a la cabeza de la industria de la telefonía móvil mundial [16].

1.3. Introducción a los esquemas de acceso de la telefonía móvil

Los esquemas de acceso múltiple son técnicas que permiten que varios usuarios puedan tener acceso a un mismo medio de comunicación, en esta sección se explicará de manera general los esquemas de acceso más utilizados en la telefonía móvil.

1.3.1. CDMA (Code Division Multiple Access)

CDMA (*"Code Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Código) es una técnica de espectro ensanchado que proviene de la técnica conocida como secuencia directa, ésta técnica es de gran utilidad para aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones [17].

En CDMA, es necesario que la señal a transmitir se haya expandido en frecuencia para así lograr su distinción entre las demás, es decir, la señal binaria que se va a transmitir se multiplica por una señal pseudoaleatoria (código pseudoaleatorio) con una tasa binaria mucho mayor que la señal a transmitir, así por ejemplo suponemos que la señal pseudoaleatoria contiene G bits por cada bit de la señal a transmitir, entonces se genera una señal con un espectro mucho mayor que el de la señal original, G veces más ancho, donde G es conocido como ganancia del proceso. Esta señal modificada se transmite ocupando todo el ancho de banda disponible en cada estación base, en principio, sin canalización alguna [17, 18, 19].

Se tiene entonces que el espectro de la señal original resulta expandido por el proceso de codificación y su densidad espectral de potencia disminuye, de tal forma que la señal codificada vista desde el dominio del tiempo, se asemeja al ruido [17].

El receptor recibe simultáneamente todas las señales transmitidas sobrepuestas y las separa a partir de la secuencia pseudoaleatoria o código que se genera en el receptor. Si los códigos son ortogonales y considerando el

canal de transmisión de forma ideal, cada usuario será inmune a las posibles interferencias intracelulares [17].

Un punto importante a mencionar es que para poder decodificar las señales CDMA debe haber una estricta sincronización entre las señales CDMA recibidas y el código generado en el receptor. La señal cuyo código original se corresponda con el código generado en el receptor, se desexpande y se vuelve a obtener una señal de baja tasa binaria pero las demás señales con códigos que no se corresponden con el generado en el receptor al estar multiplicadas por éste, continúan teniendo componentes de altas frecuencias y por lo tanto una banda ancha. Es por ello que sólo las señales interferentes CDMA de banda ancha con componentes espectrales en la banda de la señal deseada pueden causar interferencias, es decir, la interferencia dada por otros usuarios se reduce en un factor de G [17, 19].

Desde el punto de vista de ocupación del espectro un nuevo usuario siempre puede ser aceptado por el sistema CDMA con una ligera degradación de la calidad de comunicación para todos los demás usuarios, es por esto que se dice que la técnica CDMA tiene una capacidad superior a otros sistemas.

Es importante mencionar que la técnica CDMA presenta sus limitaciones, pues es necesario un estricto control de potencias de los transmisores para que de esta manera la potencia recibida por una estación base quede dentro de unos márgenes muy ajustados [19]. En CDMA el mecanismo de control de potencia se encargará de modificar la potencia de transmisión no solo cuando cambien las condiciones de propagación, sino también cuando varíe la carga del sistema o sea el número de usuarios que transmiten simultáneamente. Por lo tanto este control de potencia debe ser instántaneo para así poder compensar los desvaneciemientos rápidos y asegurar que la potencia recibida siempre sea la necesaria además de interferir en lo mínimo a los demás usuarios [20, 21].

La detección de las señales en un sistema CDMA es compleja. Existen varias técnicas, como la detección un solo usuario (*"single user"*), la detección conjunta y la cancelación de interferencias. Para el caso de la detección *"single user"* todas las señales dentro de una celda, excepto la señal deseada, se tratan como ruido, por lo que son significativas las interferencias intracélula e intercélula [17] [21].

En los sistemas de detección conjunta todas las señales dentro de una celda se detectan al mismo tiempo de tal manera que la interferencia intracélula se elimina. La cancelación de interferencias consiste en la detección de la componente más fuerte de la señal recibida, reconstruir la contribución

de esta señal a la señal total y restarla de esta última. Este proceso se repite y la interferencia efectiva se reduce [17] [21].

1.3.2. TDMA (*"Time Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Tiempo)

En TDMA (*"Time Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Tiempo) los usuarios comparten la misma frecuencia, pero transmiten en diferentes intervalos de tiempo. Se define una trama como el periodo de tiempo en el cual todos los usuarios del sistema han tenido la oportunidad de transmitir información y las ranuras ("*slots*") como los intervalos asignados a cada uno de los usuarios. En estos intervalos de tiempo los usuarios transmiten su señal mediante un formato denominado ráfaga [22, 23]. Una trama consiste de N ranuras (*"slots"*) una para cada usuario; las tramas se repiten de manera continua. El ancho de banda de transmisión es entonces N veces el ancho de banda que sería necesario para un solo usuario [22].

Hay que decir que el acceso TDMA es un acceso discontinuo, pues el usuario no transmite todo el tiempo. Sin embargo es posible soportar servicios en tiempo real de naturaleza continua sin que el usuario pierda la sensación de continuidad en dicha comunicación. En la práctica no se suelen encontrar accesos TDMA puros, sino que suelen ser un híbrido entre TDMA y FDMA. La explicación reside en que el ancho de banda total asignado a un sistema suele ser relativamente grande, de tal forma que sería complicado el uso de una única portadora además de suponer que cada usuario tendría accesos muy breves y de alta velocidad. Entonces lo que se hace es subdividir en varias portadoras y en cada una de ellas definir una estructura de trama, lo que vendría siendo un acceso TDMA [22, 24].

Como ya se mencionó en TDMA los usuarios transmiten la información mediante separaciones en el tiempo, por lo tanto, es necesaria la sincronización de la portadora en señales pasabanda además de incluir mecanismos de de sincronización temporal, es por ello que los sistemas TDMA crean estructuras de señal que incluyen secuencias conocidas por los receptores, las cuales permiten determinar las referenciaas temporales de la propia señal. Entonces la estructura de la ráfaga TDMA debe incluir una secuencia de referencia, conocida como secuencia de entrenamiento, que permita la sincronización del receptor con la señal recibida [22].

El acceso TDMA requiere un alto grado de sincronismo entre los diferentes usuarios, pues de esta manera las transmisiones de cada uno de ellos pueden acoplarse en la ranura de tiempo que les corresponde; para hacer más fácil la sincronización entre usuarios y permitir una cierta tolerancia, se deja un cierto tiempo de guarda entre ranuras consecutivas [22, 23].

Finalmente hay que agregar que la tecnología TDMA se utiliza en estándares digitales como TDMA D-AMPS (*"Digital-Advanced Mobile Phone System"*, Sistema Telefónico Móvil Avanzado Digital), TDMA D-AMPS-1900, PCS-1900 ("Personal Communication Services", Servicios de Comunicación Personal), GSM ("Global System for Mobile Communication", Sistema Global para las Comunicaciones Móviles), en el que se emplea junto con saltos en frecuencia, DCS-1800 (*"Digital Communications System"*, Sistema Digital de Comunicaciones) y PDC ("Personal Digital Cellular", Celular Digital Personal) [23, 24].

1.3.3. OFDM (*"Orthogonal Frequency Division Multiplexing"*, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)

La técnica OFDM (*"Orthogonal Frequency Division Multiplexing"*, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) es un esquema FDM (*"Frequency Division Multiplexing"*, Multiplexación por Division de Frecuencia) empleado como un método de modulación digital multiportadora. Se tiene entonces un gran número de subportadoras ortogonales espaciadas muy cercanamente que son usadas para transportar datos [29, 30].

Es una técnica en la que se divide un canal de frecuencia en un determinado número de bandas de frecuencia igualmente espaciadas, donde cada banda transmite a una subportadora y ésta a su vez transporta una parte de la información de algun usuario. Como ya se mencionó, se basa en FDM, pero con la característica de que cada subportadora es ortogonal a las demás subportadoras, entonces dado que no se utilizan bandas de separación entre cada subportadora, se tiene un mejor uso del espectro [30].

Cuando se utiliza esta técnica sólo un único usuario puede transmitir en todas las subportadoras en un momento determinado. Se utilizan técnicas de acceso múltiple por división en frecuencia o en tiempo para poder soportar múltiples usuarios.

Una de sus principales ventajas está en su capacidad para funcionar bajo condiciones díficiles; es decir presenta la habilidad de coexistir con varias condiciones severas del canal como la atenuación de altas frecuencias y el desvanecimiento selectivo de frecuencias por multitrayecto.

1.3.4. FDMA (*"Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencia)

FDMA (*"Frequency Division Multiple Access"*, Acceso Múltiple por División de Frecuencia) se considera como la primera técnica de acceso múltiple en aparecer además de ser la única factible en transmisiones analógicas. Básicamente consiste en dividir un cierto ancho de banda disponible, en divisiones más pequeñas y asignar estas divisiones a los diferentes usuarios, que pueden hacer uso de ella durante todo el tiempo, es decir, en FDMA el ancho de banda del sistema se divide en bandas de frecuencia más pequeñas y con una separación suficiente entre ellas para evitar interferencia entre canales adyacentes, así a cada usuario se le asigna una determinada banda de frecuencia de tal manera que el usuario puede utilizar un canal de transmisión todo el tiempo. Cabe mencionar que esta técnica de acceso múltiple no requiere que los usuarios estén sincronizados para poder disponer de un canal [25, 28].

Una característica importante de FDMA es que los sistemas basados en esta técnica de acceso múltiple son la base de los primeros sistemas celulares en el mundo. FDMA fue implementada en la banda de 800 MHz utilizando un ancho de banda de 30 KHz por canal [28].

FDMA presenta limitaciones en cuanto al ancho de banda, por lo que resulta ineficiente, pues se saturan los canales al aumentar el número de usuarios en una celda. Esta técnica predominó en los sistemas celulares analógicos de primera generación, por ejemplo en el sistema AMPS ("Advanced Mobile Phone System", Sistema Telefónico Móvil Avanzado) [28].

1.3.5. OFDMA ("Orthogonal Frequency Division Multiple Access", Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales)

OFDMA ("Orthogonal Frequency Division Multiple Access", Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) aplica los mismos principios

que OFDM para conseguir que varios usuarios hagan uso simultáneo de una banda de frecuencias manteniendo plena ortogonalidad entre sus respectivas señales, para esto, cada uno de los usuarios utiliza un conjunto diferente de subportadoras, las cuales pueden ser contiguas o no. Esta técnica es conocida como la versión multiusuario de OFDM y es utilizada para lograr que un conjunto de usuarios puedan compartir el espectro de un determinado canal [29, 30, 31].

OFDMA es una técnica de acceso la cual permite asignar un número diferente de subportadoras a cada uno de los usuarios, logrando de esta manera una diferente calidad de servicio para cada usuario, esto en función del ancho de banda asignado. Conceptualmente, definimos a OFDMA como una multiplexación en frecuencia en la que en lugar de utilizar una sola portadora el ancho de banda es repartido en múltiples subportadoras de frecuencias muy cercanas; las subportadoras son seleccionadas con el intervalo mínimo de frecuencias necesario para eliminar las interferencias entre ellas [30].

Todas las subportadoras OFDMA se dividen en varios grupos de subportadoras en el dominio de la frecuencia, cada uno de los cuales se denomina subcanal. Un usuario puede ocupar uno o más subcanales. Entonces varios usuarios en un intervalo de tiempo dado pueden transmitir datos simultáneamente a través de diferentes subcanales. OFDMA presenta un mecanismo de asignación flexible que hace posible asignar subportadoras dinámicamente dependiendo del tráfico, mientras distintos modos de modulación y potencias de transmisión son aplicados en diferentes subportadoras lo que da como resultado una mejor utilización de espectro [29, 30].

Un sistema OFDMA es similar a un sistema FDMA pero mucho más eficiente espectralmente hablando esto debido a que el espaciamiento entre subportadoras es reducido o incluso traslapado sin que esto represente alguna pérdida de información.

En este tipo de sistemas es necesario que el transmisor y el receptor estén sincronizados, es decir, deben contar con la misma frecuencia de modulación así como la misma escala de tiempo para así poder llevar a cabo la transmisión y poder recuperar la información de cada usuario de manera correcta sin confundirla con la información de algún otro usuario [30].

Capítulo 2

Funcionamiento y principios de OFDMA

En este capítulo se abordan las principales características de un sistema OFDMA, el modo de funcionamiento así como también las estructuras del transmisor y receptor. Además se presenta el estándar en el cual está basado el funcionamiento del sistema OFDMA que se dimensionará.

2.1. Características y Efectos del canal OFDMA

2.1.1. Pérdidas por trayecto (Path loss)

Las pérdidas por propagación se refieren a la atenuación que la señal sufre mientras se dirige del transmisor al receptor. En particular las pérdidas por trayecto son las pérdidas de potencia media que la señal experimenta entre el transmisor y el receptor. Para analizar éste tipo de pérdidas existen varios modelos que pueden ser analíticos o empíricos. Básicamente todos los modelos toman en cuenta la distancia entre el transmisor y el receptor como uno de los párametros más importantes. Así el promedio de la potencia recibida de la señal P_R está en función de la amplitud de la ruta tomada y esta dado por la ecuación 2.1 [28, 32].

$$P_R = \sum_{k=1}^{L} |\beta_k|^2 \tag{2.1}$$

donde β_k es la magnitud de la trayectoria y L es el número de trayectorias.

En general este promedio es proporcional al inverso de la distancia entre el transmisor y el receptor (r_0) y es elevado a un cierto factor de potencia (η); este factor de potencia η es el llamado exponente de pérdidas por propagación (*path loss*) el cual nos arroja la pérdida de potencia en decibeles por década conforme se incrementa la distancia [28]. Las pérdidas por propagación se calculan en función de la ecuación 2.2

$$L_p(dB) = P_{Tx}(dB) - P_{RX}(dB) \tag{2.2}$$

donde P_{TX} es la potencia transmitida, P_{RX} es la potencia recibida y L_p son las pérdidas por trayecto.

Cabe mencionar que entre los factores que alteran el valor de las pérdidas por trayecto en ambientes urbanos están los edificios, árboles, lagos, etc. Se dice entonces que cuanto más se incremente la distancia entre el transmisor y el receptor también se incrementan las pérdidas por trayecto.

2.1.2. Desvanecimientos lentos u Oscurecimientos (*Slow fading o shadowing*)

Como ya se mencionó anteriormente existen diferentes obstáculos (árboles, edificios, automóviles en movimiento, etc.) entre el transmisor y el receptor. Éstos obstáculos pueden estar dentro o fuera de la trayectoria de la señal. La forma de distribución de los obstáculos generará incrementos y decrementos extras en la pérdida de potencia. Esta variación en pérdida de potencia ocurre en distancias relativamente grandes (cientos de metros) y es conocida como desvanecimientos lentos (*slow fading*) [32].

Desde el punto de vista estadístico, generalmente se utiliza una distribución *log-normal* con media y desviación estándar cero para modelar los desvanecimientos lentos en dB. En la distribución *log-normal* las variaciones por *path loss* se modelan como $10^{\varepsilon/10}$, donde ε es una variable aleatoria normal o gaussiana. Para ambientes celulares, la desviación estándar puede variar entre 5dB y 12dB [32].

Para modelar el *slow fading* se utiliza una variable aleatoria log-normal debido a que la señal recibida es el resultado de la señal transmitida pasando a través de ó reflejándose en muchos objetos, como árboles o edificios. Cada objeto atenua la señal de alguna manera por lo que la potencia de la señal final en el receptor es el producto de las transmisiones o reflexiones de todos

éstos objetos. Entonces el logaritmo de la señal recibida es igual a la suma de un gran número de logaritmos correspondientes a las transmisiones y reflexiones de los objetos. Como este número de transmisiones y reflexiones es grande, el Teorema del límite central, establece que la distribución de ésta suma se aproxima a una distribución Gaussiana, aún cuando los términos individuales no sean Gaussianas [32].

2.1.3. Desvanecimientos rápidos (*fast fading*)

Este fenómeno se presenta cuando el receptor está en línea de vista o fuera de vista del transmisor, entonces la señal recibida está formada por un grupo de reflexiones de objetos y ninguna de las trayectorias reflejadas es más dominante que las demás. Las diferentes trayectorias de la señal reflejada llegan en diferentes tiempos, con diferentes amplitudes y con diferentes fases; éstas trayectorias se superponen de manera constructiva y destructiva causando que la potencia recibida aumente y disminuya; es decir es la diferencia de fase de las diferentes trayectorias lo que causa que la amplitud de la señal cambie de manera rápida. Éstas variaciones de pérdidas ocurren en distancias muy pequeñas (orden de longitud de onda), por lo que se denomina *fast fading*. Este tipo de *fading* tiene dos variantes, una es *Rayleigh fading*, pues una distribución de probabilidad de este tipo describe las variaciones en la potencia recibida cuando no hay LOS (Line of Sight) entre el transmisor y el receptor y cuando hay LOS (Line of Sight) es conocido como Rice Fading [28] [32].

2.1.4. Fenómeno Doppler

Este efecto ocurre cuando la señal enviada entre el transmisor y el receptor, y éste ultimo se encuentra en movimiento a una cierta velocidad, por lo que existe un cambio en la frecuencia de la señal, este fenómeno es conocido como *Doppler Shift* [32]. Éste efecto es modelado a menudo en el dominio de la freucuencia y es conocido también como *dipersión en frecuencia*. Como ya se mencionó el efecto Doppler (Doppler Spread) ocurre en el dominio de la frecuencia cuando hay movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, entonces el cambio en frecuencia o *Doppler shift* es [32]:

$$f_D = -\nu \frac{f}{c} \cos\phi \tag{2.3}$$

donde f_D es el *Doppler shift* (cambio en frecuencia), ν es la velocidad relativa entre el transmisor y el receptor, f es la frecuencia de la portadora de la señal, c es la velocidad de la luz y ϕ es el ángulo entre la velocidad del movimiento relativo y la dirección de la transmisión.

Cuando hay movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, una portadora con una frecuencia f será recibida como $f + f_D$. Cuando el transmisor y el receptor se mueven directamente uno hacia el otro, la velocidad relativa ν es positiva, es decir la frecuencia f de la portadora es cambiada a $f + |f_D|$. Cuando el transmisor y receptor se alejan uno de otro, la velocidad relativa es negativa, es decir la frecuencia f de la portadora es recibida como $f - |f_D|$.

2.2. Estándar IEEE 802.16

2.2.1. Evolución del estándar IEEE 802.16

Fue en el año de 1998 cuando la IEEE creó el grupo 802.16 para poder desarrollar el estándar (WMAN) Wireless Metropolitan Area Network, al principio este grupo utilizaba las bandas de 10 GHz a 66 GHz para realizar enlaces fijos de alta velocidad y con línea de vista libre además de no tener movilidad. Éste estándar se aprobó en diciembre del 2001 y fue conocido como Wireless MAN-SC [33] [34].

Posteriormente éste grupo comenzó a trabajar en las frecuencias de 2 GHz a 11 GHz realizando algunas modificaciones en la capa física así como en el control de acceso al medio. Todos estos cambios se estandarizaron con el nombre de 802.16a en el año 2003 [33].

Siguiendo con la evolución se comenzó a trabajar en la calidad de servicio e incrementando el espectro utilizando las bandas de frecuencia de 5 GHz a 6 GHz, lo que fue conocido como 802.16b.

Es entonces cuando se comienzan a establecer las características obligatorias y opcionales del estándar 802.16, tales como la interoperabilidad. Todo ésto se encuentra en el estándar 802.16c. Además en el 2004 se realiza una nueva revisión del estándar 802.16a para actualizarlo con el nombre de 802.16d. Después surgió la versión 802.16e en el año 2005 la cual es una ampliación de la versión 802.16d y se diferencia de las versiones anteriores porque esta nueva versión ofrece movilidad de hasta 120 km/hr y el servicio conocido como *roaming*; en otras palabras esta versión se conoce como

WiMax móvil y utiliza la banda de los 2 GHz a los 6 Ghz, permitiendo velocidades de 15 Mbps [33] [34].

2.2.2. Capas de protocolos

El estándar 802.16 está basado en el modelo de referencia OSI, en cada capa se especifican las funciones que debe de realizar y los servicios que presta a capas superiores. Las capas que se encuentran en la parte más baja (capa física, de enlace y de red) son las encargadas de trabajar sobre el hardware mientras que las capas superiores se encargan de la ejecución del software para la manipulación de las capas más bajas [33].

El estándar 802.16 trata lo referente a las funciones de la capa física y la capa de enlace de datos, para esto divide la capa de enlace de datos en dos subcapas: la subcapa de control lógico del enlace (LLC) y la de control de acceso al medio (MAC).

En cuanto a la capa física, su función principal es crear una especie de conexión fisica entre las dos terminales para la comunicación, mientras tanto la subcapa MAC es la responsable de mantener dicho enlace y la subcapa LLC se encarga de especificar los mecanismos para el direccionamiento de las estaciones remotas conectadas al medio y controlar el intercambio de datos entre los usuarios [34].

2.2.3. Capa física (PHY)

La capa física es la encargada de establecer la conexión física entre los extremos de la conexión siendo ésta generalmente en dos direcciones: *downlink* y *uplink*. Las funciones propias de esta capa están enfocadas a definir el tipo de señal a utilizarse, la modulación y demodulación, el acceso múltiple, la codificación del canal, la tecnología de las antenas y la potencia de transmisión. Esta capa es también responsable de la transmisión de la secuencia de bits y de la estimación de las condiciones del canal [33].

Las etapas funcionales de la capa física se resumen de la siguiente manera, primero se realiza el FEC (Forward Error Correction) lo que incluye la codificación de canal, tasas de combinaciones, etc. Posteriormente se realiza la construcción del símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia, así que durante esta etapa los datos son mapeados hacia los subcanales o subportadoras apropiadas. Finalmente el símbolo OFDM es convertido del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo [33].

Por otra parte el estándar 802.16 contiene cinco especificaciones de radio para su capa física y que al utilizarse en conjunto con las demás capas ofrecen una conexión confiable extremo a extremo. Cada una de estas especificaciones son una variante en función de la modulación y las bandas de frecuencia utilizadas y son las siguientes [33] [34]:

- **Red de Área Metropolitana con una sola portadora (WMAN-SC).** Esta especificación está desarrollada para trabajar en la banda de frecuencia de los 10 GHz a los 66 GHz con línea de vista (LOS). Se caracteriza por optimizar sus sistemas con respecto a costo, capacidad de radio, servicios y capacidad. Soporta TDD y FDD, half y full-dúplex con canales de ancho de banda de 20, 25 ó 28 MHz y puede operar con las modulaciones QPSK, 16-QAM ó 64-QAM.

- **Red de Área Metropolitana Inalámbrica con una sola portadora (WMAN-SCa).** Opera en la banda de frecuencias menores a 11 GHz; utiliza la topología punto-multipunto además de contar con una interfaz de radio con modulación de portadora única, trabaja con TDD y FDD, cuenta con canales de ancho de banda de 3.5 y 7 MHz para las bandas de 2.5 y 3.5 GHz, también con canales de ancho de banda de 10 y 20 MHz para la banda de 5 GHz. Para el caso del *downlink* utiliza TDM y para el *uplink* utilia TDMA. Puede utilizar diferentes tipos de modulaciones como BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.

- **Red de Área Metropolitana Inalámbrica con Multiplexaje con División de Frecuencias Ortogonales (WMAN-OFDM).** Se basa en la técnica OFDM y está diseñada para enlaces sin línea de vista (NLOS) y con frecuencias por debajo de los 11 GHz. Su diseño se enfoca para accesos fijos en hogares y empresas. Utiliza las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Opera con canales de ancho de banda de 1.75, 3, 3.5, 5, 5.5, 7 MHz en las bandas de frecuencia de 2.5 GHz y 3.5 GHz; mientras que en la banda de frecuencia de 5 GHz utiliza canales de ancho de banda de 10 MHz. Cuenta con subcanalización y utiliza los siguientes tipos de subportadoras: subportadora de datos, subportadora piloto y subportadora nula.

- **Red de Área Metropolitana Inalámbrica con Múltiple Acceso por División de Frecuencias Ortogonales (WMAN-OFDMA).** Cuenta con un esquema de portadoras múltiples (1024 ó 2048) OFDM

con enlaces NLOS en topología punto-multipunto. En la banda de frecuencia de 2 a 11 GHz utiliza canales de ancho de banda de 1.25, 3.5, 7, 8.75, 14, 17.5 y 28 MHz. En la banda de 5 GHz utiliza canales de ancho de banda de 10 MHz y 20 MHz. Utiliza las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

- **Wireless HUMAN.** Su principal característica es que incluye técnicas para compensar los efectos de interferencia por multitrayectoria tales como la AAS (Adaptative Antenna System) que permite el uso de varias antenas para fijar el diagrama de radiación en una dirección dada, permite también la técnica conocida como STC (Space Time Coding) para realizar diversidad de tipo espacial en la transmisión así como la técnica ARQ (Automatic Repeat Request) para el control de errores y retransmisión de paquetes pérdidos.

2.2.4. Subcanalización

Puesto que WiMax en su capa física utiliza OFDM u OFDMA las subportadoras disponibles son divididas en varios grupos que se llaman sub-canales y es en éstos en los que se concentra la mayor cantidad de energía lo que incrementa el requerimiento de ganancia del sistema, obteniendo mayor alcance y superando las pérdidas por penetración [33].

Específicamente WiMax móvil, utiliza OFDMA en su capa física, por lo que es posible la subcanalización en los dos tipos de enlaces, entonces los subcanales son la mínima unidad de frecuencia asignada por la estación base. Además se pueden asignar subcanales diferentes a usuarios diferentes como un mecanismo de acceso múltiple lo que hace posible la subcanalización con subportadoras contiguas o bien subcanalización con subportadoras distribuidas aleatoriamente llamada también como esquema de uso parcial de subportadoras (PUSC) que favorece las aplicaciones móviles [33].

2.2.5. Capa MAC

La función principal de la capa MAC es la de proporcionar una interfaz entre las capas superiores y la capa física; es por ello que se encarga de tomar los paquetes de las capas superiores y encapsularlos en PDUs y para transmitirlos en la interfaz de aire. Mientras que en el receptor se realiza

la tarea inversa, es decir, la desencapsulación de los paquetes recibidos y el envío a las capas superiores [33] [34].

Las principales funciones de esta capa son la segmentación de las SDUs que recibe de las capas superiores y el ensamble en PDUs, también selecciona el nivel de potencia que se debe utilizar para la transmisión de las PDUs, generará la retransmisión de los paquetes con algún error en recepción y ofrece también manejo de prioridades. A su vez apoya la movilidad a las capas superiores, brinda seguridad y administración de claves y proporciona ahorro de energía [33] [34].

La capa MAC incluye una subcapa de convergencia que es como una interfaz a los protocolos de capas superiores como por ejemplo: ATM, Ethernet, IP, Telefonía digital, audio y video digital, entre otros. Además esta subcapa identifica al destino tomando en cuenta las diferentes rutas en las que pueden viajar los paquetes y la dirección de origen [33] [34].

La capa MAC se divide en 3 partes [34]:

- **Subcapa de convergencia de servicios específicos (CS).** Puede ser vista como una subcapa de adaptación, que enmascara los protocolos de capas superiores y sus requerimientos para la capa MAC y la capa física.

- **Subcapa MAC CPS.** Esta subcapa brinda los servicios de acceso al sistema, asignación de ancho de banda y además realiza todas las operaciones de paquetes qe son independientes de la capa superior, tales como el encapsulado, la concatenación, fragmentación, empaquetamiento, contro de QoS y ARQ (Automatic Repeat Request).

- **Subcapa de privacidad o seguridad.** Es la responsable de la autenticación, encriptado y autorización; es decir es donde se realiza el intercambio de las PDUs de la capa MAC y la capa física.

La capa MAC de la estación base es la responsable de la asignación del ancho de banda para cada uno de los usuarios, cabe mencionar que cuando la estación móvil tiene conexiones múltiples con la estación base ésta decide qué ancho de banda le asigna y la estación móvil decide la forma de repartir ese ancho de banda con todas las conexiones [33] [34].

Para el enlace de bajada, la estación base realiza la asignación del ancho de banda de acuerdo con el tráfico entrante. Para el enlace de subida la asignación se debe realizar con base en las peticiones de la estación móvil,

entonces la estación base asignará recursos dedicados o compartidos periódicamente, es decir a través de un sondeo.

2.2.6. Tipos de topología

Topología punto-punto

Ocurre cuando la comunicación se realiza entre dos puntos, es decir entre el transmisor y el receptor. La estación base es la encargada de controlar toda la comunicación y establece los vínculos con la subscriber station (SS) [33] [34].

Topología punto-multipunto

Se compone de una estación base (BS) y múltiples *subscriber station* (SS), es muy utilizada para el acceso de banda ancha y para servicios inalámbricos de largo alcance, puede ser usada en medios con línea de vista i sin línea de vista [33].

Topología Mesh Es considerada como una alternativa a la topología punto-multipunto y se utiliza para expandir la cobertura sin necesidad de incrementar las estaciones base. En esta topología cada nodo de usuario se encuentra conectado a las estaciones base y la comunicación se realiza a través de nodos los cuales actúan como *routers*, cada unos de los nodos envía una señal para alcanzar a los nodos vecinos y de esta manera darse a conocer. Este tipo de redes permiten adaptarse a cambios en la topología ya sea aumentando o eliminando nodos [33].

2.3. Transmisor OFDMA

En la Figura 2.1 se observa el diagrama de bloques de un transmisor OFDMA, se considera que la transmisión de bits provenientes de la capa MAC entran al bloque aleatorizador de datos. La función de este bloque es codificar los datos para evitar sean interceptados por algun otro receptor, también se encarga de redistribuir los bits para evitar largas corridas de 1s ó 0s ya que estas largas corridas podrían causar que alguna subportadora no llegue modulada, además las largas corridas de 1 ó 0 podrían causar que la transmisión de bits recibida pierda sincronización, pues un buen nivel de sincronización de bits requiere un número suficiente de transiciones en un tiempo dado. Este bloque solo opera sobre la información de los bits y está presente en los dos tipos de enlace: *uplink* y *downlink* [32].

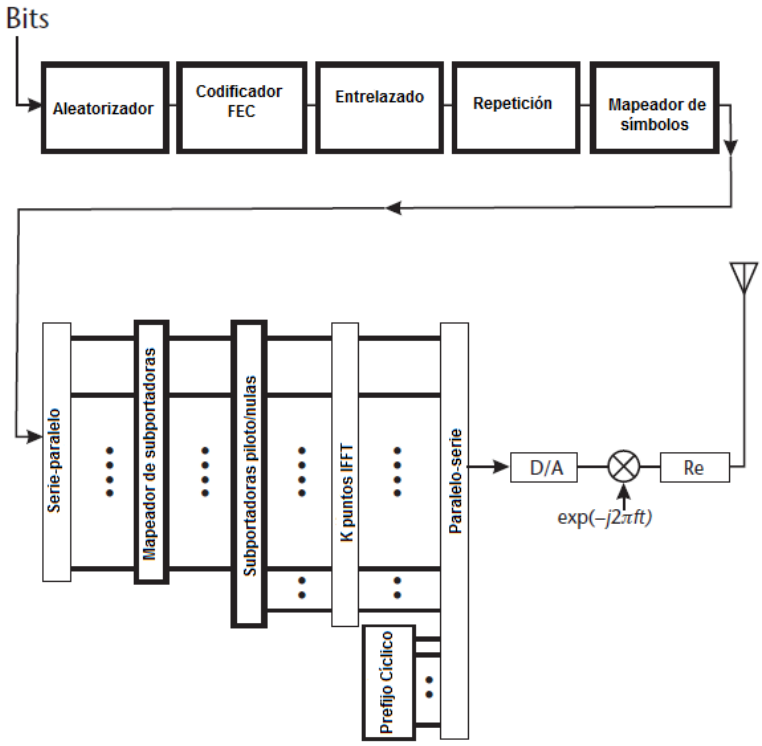

Figura 2.1: Transmisor OFDMA

Después del bloque de aleatorización de datos, los bits codificados van hacia el bloque FEC (Forward Error Correction), este bloque utiliza un código de corrección de error para agregar bits de redundancia para la correción de errores. Existen varios tipos de códigos FEC entre los que se pueden mencionar los códigos convolucionales, turbo código de bloque, turbo códigos convolucionales y código para comprobar la paridad de baja densidad [32].

Posteriormente, los bits codificados son operados por el bloque de entrelazado (*interleaver*) cuyo propósito es asegurar que los bits codificados lleguen con la suficiente separación en términos del dominio de la frecuencia [32].

Después de la etapa de entrelazado (*interleaving*) los bits son organizados en ranuras (*slots*), por lo que ente punto el sistema puede hacer uso de la función de repetición para incrementar la confiabilidad de los bits transmitidos, los bits pueden ser repetidos a una tasa de 2, 4 ó 6. La repetición ofrece una forma rápida para compensar la capacidad por cobertura. Ésta compensación resulta en una disminución de la capacidad pues los *slots* disponibles

son ocupados por bits repetitivos [32].

El asignador de símbolos se encarga de mapear o asignar los bits a los símbolos de datos basándose en la constelación de la modulación utilizada (QPSK, 16-QAM ó 64-QAM). Es conveniente notar que cada símbolo de datos puede ser un símbolo ya sea QPSK, 16-QAM ó 64-QAM dependiendo de las condiciones del canal experimentadas por la subportadora correspondiente. Es decir si la subportadora experimenta una SINR alta, entonces podría llevar un símbolo de datos 64-QAM para que de esta manera se maximice la tasa de bits. En cambio si la subportadora experimenta una SINR baja entonces lleva un símbolo de datos QPSK [28, 32].

El bloque que consiste en el convertidor serie-paralelo es el encargado de realizar la conversión serial de los símbolos de datos en transmisiones en paralelo. Luego los símbolos de datos se dirigen al bloque de asignación de subportadoras, el cual como su nombre lo indica asigna o mapea los símbolos de datos individuales a las subportadoras individuales. La importancia de la asignación de subportadoras en un sistema OFDMA radica en que debido a que los símbolos de datos pueden ser de diferentes usuarios por lo que la asignación de símbolos de datos a diferentes subportadoras permite que múltiples usuarios puedan acceder a la interfaz de aire de manera simultánea [28, 32].

La función para la inserción nula o piloto se encarga precisamente de insertar símbolos que son conocidos como símbolos piloto y símbolos nulos. Las subportadoras piloto son necesarias para la estimación del canal y las subportadoras nulas incluyen las subportadoras de espera (guarda) y la subportadora DC. Las subportadoras de guarda nula y la subportadora nula DC no tienen potencia. Así las subportadoras de guarda juegan un papel importante pues ayudan a mantener el espectro en los bordes de la banda [32].

La entrada a los *K puntos de la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)* consiste de un total de K símbolos paralelos, entre los que se incluyen símbolos de datos, símbolos piloto y símbolos nulos. Los *K puntos IFFT* transforman los símbolos de datos, los símbolos piloto y los símbolos nulos del dominio de la freucuencia al dominio del tiempo. Entonces los K símbolos tranformados junto con los g símbolos del prefijo cíclico van ahora hacia el bloque convertidor paralelo-serie, el cual produce a su salida los símbolos transformados al dominio del tiempo. Por lo tanto en la salida del convertidor paralelo-serie, el bloque de los K símbolos transformados constituye un símbolo OFDM y los símbolos g CP constituyen el prefijo cíclico [32].

Finalmente el bloque convertidor digital-analógico cambia los símbolos en tiempo discreto a señales analógicas que son las que serán transmitidas [32].

2.4. Receptor OFDMA

El receptor OFDMA, después del proceso de la conversión analógica-digital, los símbolos de tiempo discreto recibidos y en banda base van hacia el bloque de conversión serie-paralelo, el cual como su nombre lo indica convierte la transmisión serial de los símbolos recibidos en transmisiones paralelas. Los g símbolos de prefijo cíclico son quitados por lo que los K símbolos restantes son procesados por la función FFT que transforma los K símbolos en el dominio del tiempo a los K símbolos de datos en el dominio de la frecuencia [28] [32] .

El bloque ecualizador compensa los efectos del canal y además corrige el símbolo de datos recibido para que posteriormente el detector haga una estimación sobre cuáles son los símbolos de datos originales. Los pilotos son leídos y utilizados para propósitos de estimación del canal y entonces los símbolos piloto y los símbolos nulos son quitados, de esta manera se tienen los símbolos de datos restantes son los símbolos de datos recuperados [28] [32].

Posteriormente el bloque conocido como demapeador de subportadoras acomoda los símbolos de datos recuperados en el orden en el cual fueron asignados originalmente los usuarios a as subportadoras individuales. De hecho, el demapeador de subportadoras es el encargado de asignar los símbolos de datos a cada usuario de manera individual [32].

El convertidor paralelo-serie se encarga de reordenar las subtransmisiones paralelas correspondientes a los símbolos de datos recuperados en una única transmisión de tasa alta de los símbolos de datos. Esta transmisión va hacia el bloque demapeador de símbolos, el cual hará corresponder cada uno en la transmisión con el patrón de bits que representa dicho símbolo. Finalmente la transmisión de bits resultante pasará a través de los bloques inversos de repetición, entrelazado, codificación FEC y aleatorizador [32].

2.5. OFDMA: Forma de operación

OFDMA es un método que asigna diferentes grupos de subportadoras ortogonales en frecuencia a diferentes usuarios. De esta manera, es posible que más de un usuario pueda acceder a la interfaz de aire al mismo tiempo.

El bloque conocido como asignador (mapeador) de subportadoras es clave en la implementación de un sistema OFDMA porque es este bloque precisamente el que como su nombre lo indica asigna usuarios a las subportadoras [32].

Es conveniente explicar la forma de funcionamiento de OFDM y realizar una comparación con OFDMA por lo que en la Figura 2.2 se puede ver un ejemplo de asignación de símbolos OFDM, se tienen 3 usuarios (A, B, C), y 8 subportoras, también se puede observar como los usuarios son asignados a las subportadoras como una función del tiempo. En OFDM el asignador (mapeador) de subportadoras asignará todas las subportadoras a un único usuario en el tiempo, al realizar esto solamente un usuario puede tener acceso a la interfaz de aire a la vez. Así que en este caso a cada usuario le es asignado un símbolo OFDM en el tiempo de tal manera que los usuarios deben tomar turnos para tener acceso a la interfaz de aire [32].

Para el caso de OFDMA el mapeador de subportadoras asigna diferentes usuarios a diferentes subportadoras en el tiempo; cabe mencionar que existen dos maneras de asignar usuarios a subportadoras: por medio de subportadoras distribuidas y subportadoras contiguas. Es conveniente agregar que a un conjunto de subportadoras se le conoce como subcanal. En la Figura 2.3 se puede observar que se tienen subportadoras distribuidas por lo que los usuarios son asignados de manera pseudoaleatoria a las subportadoras [32].

En cambio en la Figura 2.4 se observa que se tienen subportadoras contiguas, en este caso las subportadoras son asignadas a los usuarios en grupos continuos.

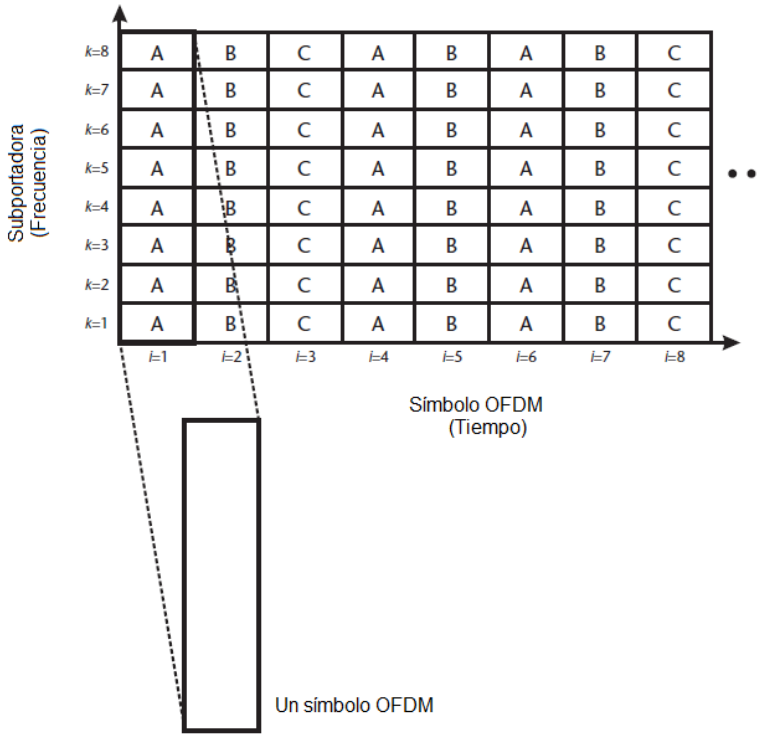

Figura 2.2: Funcionamiento de un sistema OFDM

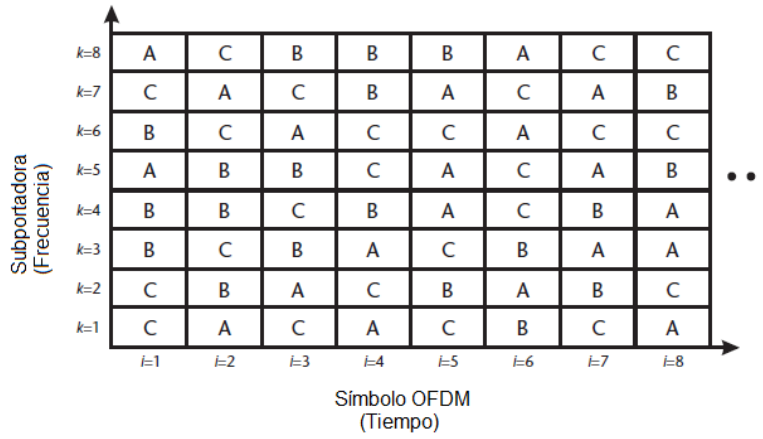

Figura 2.3: Funcionamiento de un sistema OFDMA (subportadoras distribuidas)

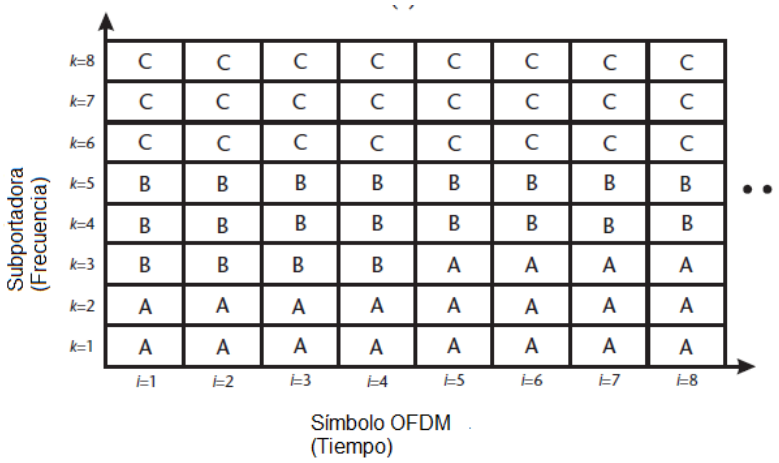

Figura 2.4: Funcionamiento de un sistema OFDMA (subportadoras contiguas)

Capítulo 3

Elementos para la evaluación del desempeño en redes OFDMA

3.1. SIR (Signal to Interference Ratio)

Al diseñar un sistema OFDMA se considera la cobertura como uno de los factores más importantes en dicho sistema; para los sistemas *wireless* móviles de banda ancha satisfacer el requerimiento de cobertura significa que el enlace de radio debe cumplir con una cierta SIR (Signal to Interference Ratio) mínima requerida, es decir el conjunto de estaciones base deben entregar la suficiente potencia RF en el área de cobertura requerida, las estaciones base pueden recibir una adecuada potencia RF en la misma área y cada receptor en el sistema no debe experimentar interferencia excesiva [32].

Así la SIR queda expresada en la Ecuación 3.1

$$SIR_i = \frac{P_T^{0,i} L_p^{0,i} u_l^{0,i} G(\phi_{0,i})}{\sum_{k=1}^{N_{BS}} L_p^{k,i} u_l^{k,i} G(\phi_{k,i})} \tag{3.1}$$

Donde:

$P_T^{0,i}$ es la potencia EIRP del i-ésimo usuario respecto a la estación base cero.

$L_P^{0,i}$ son las pérdidas por propagación para el i-ésimo usuario respecto a la estación base cero.

u_l^j son otras pérdidas relacionadas con la propagación por ejemplo las pérdidas por ensombrecimiento (*shadowing*) y pérdidas por caídas rápidas (*fast fading*) para el i-ésimo usuario respcto a la estación base cero.

G_R^j es la ganancia de la antena del i-ésimo usuario respecto a la estación base cero.

BS es el número de estaciones base interferentes.

$P_T^{0,i}$ es la potencia EIRP del i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base.

$L_P^{0,i}$ son las pérdidas por propagación para el i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base.

u_l^j son otras pérdidas relacionadas con la propagación por ejemplo las pérdidas por ensombrecimiento (*shadowing*) y pérdidas por caídas rápidas (*fast fading*) para el i-ésimo usuario respcto a la k-ésima estación base.

G_R^j es la ganancia de la antena del i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base.

BS es el número de estaciones base interferentes.

3.2. Interferencia

En el caso de un sistema OFDMA con múltiples celdas, un usuario puede experimentar interferencia de otras celdas o en su caso sectores cercanos. Entonces para calcular el término de Interferencia (I) para algún usuario se debe partir de la Ecuación (3.2) para agregar las respectivas contribuciones de cada uno de los usuarios restantes [32].

$$I^i = \sum_{j=1}^{M} P_T^j L_P^j u_g^j u_l^j G_R^j \tag{3.2}$$

Donde:

I^i es la interferencia del i-ésimo usuario.

P_T^i es la potencia EIRP del j-ésimo usuario.

L_P^j son las pérdidas por propagación para el j-ésimo usuario.

u_g^j son otras ganancias dadas por el sistema como ganancia por macro diversidad para el j-ésimo usuario.

u_l^j son otras pérdidas relacionadas con la propagación por ejemplo las pérdidas por ensombrecimiento (*shadowing*) y pérdidas por caídas rápidas (*fast fading*).

G_R^j es la ganancia de la antena del j-ésimo usuario.

M es el número de estaciones base interferentes.

3.3. Relación Energía a Interferencia E_b/I_0

En un sistema celular OFDMA, la relación Señal a Interferencia es una funciónde la razón de la energía de bit a densidad espectral de interferencia tal como se define en la Ecuación 3.3 [3] [32] [35] .

$$\gamma = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_i = \frac{W_O}{R_i} SIR_i \tag{3.3}$$

Donde:

SIR_i es la relación señal a interferencia del i-ésimo usuario.

R_i es la tasa de transmisión del i-ésimo usuario.

W_O es el ancho de banda.

3.4. Tasa de transmisión R_i y Desempeño (*Throughput*)

La tasa de transmisión R_i se refiere a la cantidad de bits por segundo que puede ser entregada por una estación base o un sector y es válida para los dos tipos de enlaces (*uplink y downlink*) y dependiendo del tipo de modulación empleado [35, 32].

Cuando la tasa de transmisión alcanza su valor máximo se habla del parámetro conocido como *throughput* (desempeño) y es precisamente este

parámetro el que es de interés para conocer la capacidad de un sistema celular OFDMA.

Entonces la definición correspondiente al desempeño del sistema queda expresada en términos de la tasa de transmisión de acuerdo a la Ecuación 3.4.

$$R_i = \begin{cases} (W_O/\gamma)SIR_i & \text{si} \quad SIR_i < m\gamma \\ \\ 2W_O & \text{si} \quad SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \tag{3.4}$$

donde m toma los valores que cambian de acuerdo con el esquema de modulación empleado. Para Q-PSK, $m = 2$, para 16-QAM $m = 4$ y para 64-QAM, $m = 8$.

Ésta es la ecuación principal para poder conocer evaluar el desempeño de este tipo de sistemas, el *throughput* (desempeño) arroja la máxima tasa de transmisión alcanzable R_i para un usuario, por lo que cualquier mejora en la SIR experimentada por cada uno de los usuarios podría representar un mejor rendimiento y por lo tanto mejorar la capacidad del sistema.

3.5. Modulaciones Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM

En los sistemas celulares OFDMA se consideran tres tipos de modulaciones:Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM, en esta sección se explicarán estas modulaciones ya que son fundamentales dentro de los parámetros para el desempeño del sistema. Estas modulaciones se dice que son *M-arias* pues se envía una de M posibles señales durante cada cierto intervalo de tiempo T. Se define entonces que $M = 2^m$, donde M es el conjunto de todas las posibles señales y m debe ser un entero.

Modulación Q-PSK

En la modulación Q-PSK la fase de 2π radianes es distribuida de manera equitativa entre las 4 ($M = 4$) señales de transmisión; la expresión de las formas de onda transmitidas por $s_i(t)$ de acuerdo a la Ecuación 3.5 [36] [37]:

$$s_i\left(t\right) = \sqrt{\frac{2E}{T}} cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} i\right) \tag{3.5}$$

$i = 0, 1, ..., M-1$ y $0 \leq t \leq T$

donde:

E es la energía de la señal.

T es la duración de cada símbolo.

f_c es la frecuencia de la portadora.

Para este tipo de modulación, de acuerdo con las ecuaciones anteriores, se sabe que $M = 2^m$ entonces se tiene que $M = 4$ por la definición de la modulación, por lo tanto $m = 2$.

Modulación 16-QAM y 64-QAM

Este tipo de modulación combina la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK). La señal está definida en la Ecuación 3.6 [36] [37]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_i sen(2\pi f_c t) \tag{3.6}$$

Para este tipo de modulación, de acuerdo con las ecuaciones anteriores, se sabe que $M = 2^m$ entonces se tiene que $M = 16$ por la definición de la modulación, por lo tanto $m = 4$, para el caso de la modulacion 16-QAM y para el caso de la modulacioón 64-QAM $M = 64$ y $m = 8$

3.6. Reutilización en frecuencia

La reutilización en frecuencia se refiere a que el sistema utiliza los mismos bloques de frecuencia más de una vez. Ésta técnica es muy útil pues cuando se hace uso de la reutilización en frecuencia hay mejoras en la SIR del enlace.

Un concepto importante en la reutilización de frecuencia es el término *cluster*, que se refiere a un grupo de celdas, las cuales utilizan solo una vez las frecuencias que se encuentran disponibles en el sistema. El número de celdas en un *cluster* corresponde al factor de reutilización en frecuencia, N. En general la asignación de los bloques de frecuencia se realiza tomando en cuenta la Ecuación 3.7 [32]:

$$N = i^2 + ij + j^2 \tag{3.7}$$

se debe cumplir que $i \geqslant 1$ y $j \geqslant 0$

i es la distancia de traslación.

j es el ángulo de rotación.

Existen varios factores de reutilización entre los que se pueden mencionar 1, 3, 4 y 7, dependiendo de las características del sistema.

La reutilización de frecuencia puede ser descrita con la siguiente configuración: $NxSxK$ donde N es el número de celdas en un *cluster*, S es el número de sectores en cada celda y K es el número de bloques de frecuencia en una celda.

3.7. Parámetros básicos de antenas

Una antena se define como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Son dos los objetivos de una antena; transmitir y recibir, en cada aplicación se tienen condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo y otros parámetros más [38] [39] [40].

Así una antena debe radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación [39].

Una antena transmisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas y la antena receptora realiza la función inversa citeantenas1 [39].

Una antena formará parte de un sistema más amplio, por lo que es importante caracterizarla con una serie de parámetros que la describan y permita evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena o bien especificar el comportamiento deseado de una antena para considerar incluirla en dicho sistema [39].

Las antenas se caracterizan por una serie de parámetros, entre los que se pueden mencionar: respuesta en frecuencia, polarización, ganancia, longitud y área efectiva, peso, dimensiones, entre otros [38] [39] [40].

A continuación se describirán los parámetros más importantes [38] [39] [40]:

- Ancho de banda: Es el margen de frecuencias en el cual los parámetros de la antena cumplen con ciertas características, es posible definir un ancho de banda de impedancia, de polarización, de ganancia o de otros parámetros.

- Directividad: Es la relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación y la potencia total radiada dividida por el área de la esfera. La directividad se puede calcular a partir del diagrama de radiación. La ganancia de una antena es igual a la directividad multiplicada por la eficiencia. La relación entre la densidad de potencia radiada por la antena en la dirección útil y la que radia por el lóbulo trasero se conoce como relación *forward/backward* y es uno de los parámetros más importantes en relación a interferencias.

  El ángulo que hace referencia al diagrama de radiación del lóbulo principal en el plano horizontal de la antena se denomina *azimut*, para el diagrama de radiación vertical se denomina ángulo de elevación, y se diseña para concentrar el máximo de radiación para los ángulos por debajo de la horizontal.

- Diagrama de radiación: Es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija. Normalmente se emplea un sistema de coordenadas esféricas. Con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresa el campo eléctrico en función de variables angulares. En un diagrama de radiación típico, es posible observar una zona en la que la radiación es máxima, a la que se le denomina haz principal o lóbulo principal. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se denominan lóbulos laterales y al lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario.

- Ganancia: Es la relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección máxima y la potencia total entregada a la antena dividida por el área de una esfera. La eficiencia es la relación entre la ganancia y la directividad, que coincide con la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena.

- Rendimiento en la antena: El rendimiento de una antena transmisora es la relación entre la potencia de radiación y la potencia total aplicada a la antena, en la cual también se toma en cuenta, además de la potencia de radiación, la potencia de pérdida.

- Anchura de haz: Este parámetro está relacionado al diagrama de radiación. Es posible definir el ancho de haz a 3 dB, que es el intervalo

angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la máxima.

- Intensidad de radiación: Es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, a grandes distancias tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena.

3.7.1. Antenas sectoriales

Las antenas sectoriales emiten un haz más amplio que una direccional pero no tan amplio como una omnidireccional. De igual modo, su alcance es mayor que una omnidireccional y menor que una direccional. Para tener una cobertura de 360° y un largo alcance se pueden tener tres antenas sectoriales de 120°. Se emplean antenas direccionales psrs reducir el nivel de interferencia [32] [39].

Una antena direccional (directiva) es una antena capaz de concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor o desde la fuente deseada y evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas [39].

Las antenas direccionales, proporcionan mucho mejor rendimiento pues concentran gran parte de la radiación en una dirección deseada.

Capítulo 4

Modelado y construcción de la plataforma de evaluación del desempeño de la red OFDMA en MATLAB

Especificaciones de la simulación

La simulación realizada en MATLAB es una simulación de eventos discretos tipo Montecarlo para evaluar el enlace de bajada (*downlink*) del sistema OFDMA; el primer paso en esta simulación es tener la red celular de configuración hexagonal para cada celda y cada celda dividida a su vez en tres sectores cada 120°, el radio de cada celda es en este caso de 1 km. Se evalúa el desempeño del enlace de bajada tomando como referencia la celda central. En consecuencia es en esta región en la que se generan los n usuarios aleatorios con distribución uniforme, empleando la función que MATLAB ofrece con éstas características. Posteriormente se debe hacer la estimación de las pérdidas por propagación, los efectos por *shadowing* y los efectos por *fastfading*.

Un paso muy importante en la simulación es la estimación del ángulo ϕ, el cual es calculado entre la dirección de máxima radiación de la antena y el usuario deseado ubicado en la celda central.

Así pues, al obtener el ángulo ϕ, es posible obtener la estimación de la ganancia de la antena $G(\phi)$.

Posteriormente se evalúa la SIR del sistema para cada uno de los usuarios generados y finalmente se realiza el paso más importante que es la evaluación

de la Tasa de transmisión R_i y al obtener sus valores máximos hablamos del desempeño del sistema en términos de *throughput* para un conjunto de valores de γ. Se realiza la evaluación para las tres modulaciones del sistema: 64-QAM, 16-QAM y Q-PSK. Además se realizan pruebas utilizando diferentes patrones de reuso de frecuencias.

Todo esto queda expresado en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 4.1.

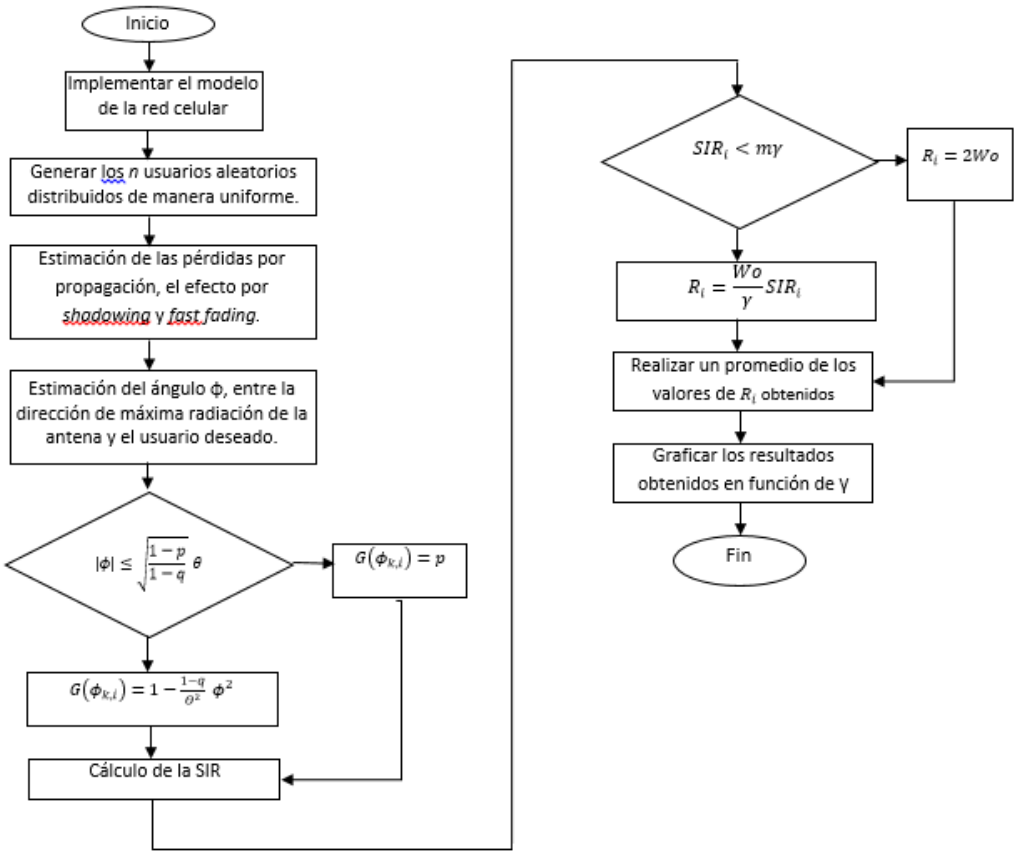

Figura 4.1: Diagrama de flujo de la simulación.

4.1. Modelo de la red celular

El modelo de la red celular consta de un total de 37 celdas, las cuales se encuentran distribuidas alrededor de la celda central en tres anillos; es decir el primer anillo consta de seis celdas, el segundo consta de 12 celdas y el tercero consta de 18 celdas.

Aquí es conveniente recordar el concepto de celda, una celda es cada una de las n regiones hexagonales en que se encuentra dividida el área geográfica de interés. Se utiliza la configuración de celdas hexagonales porque esto permite un acoplamiento perfecto entre ellas, de tal forma que se aprovecha al máximo el área disponible, cosa que no sucede si se utilizaran celdas de forma circular.

En la Figura 4.2 se puede ver el arreglo de celdas mencionado y que ha sido generado en MATLAB.

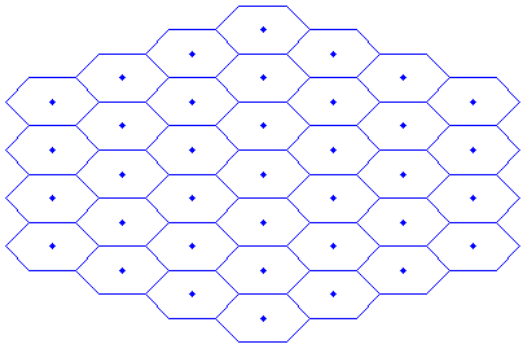

Figura 4.2: Red celular con 37 celdas

Posteriormente se realizó la sectorizacion de la red antes mencionada, la sectorización consiste en subdividir a cada celda en este caso en tres sectores cada 120°. Esta sectorización se puede apreciar en la Figura 4.4.

Ahora que ya se tiene la red celular, el paso siguiente es generar las estaciones base y ubicarlas en el centro de cada una de las celdas; además se deben generar los n usuarios aleatorios en la celda central, dichos usuarios estarán ditribuidos de manera uniforme. Esto se puede observar en la Figura 4.4

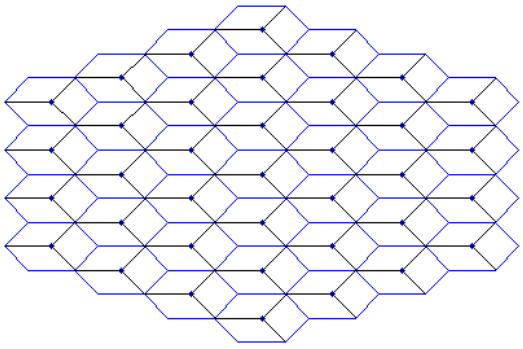

Figura 4.3: Red celular sectorizada.

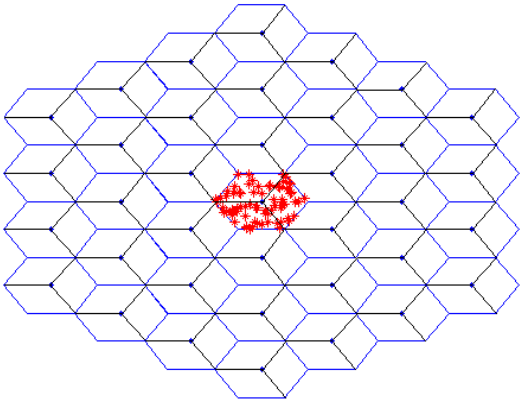

Figura 4.4: Red celular sectorizada.

4.2. Implementación de las ecuaciones de la red OFDMA

Para poder realizar la simulación de la red celular OFDMA es necesario que las ecuaciones que describen el sistema se implementen en MATLAB a través de mediciones con respecto a la posición de cada usuario de interés para posteriormente poder hacer los cálculos en función de los resultados que arroje dicha simulación.

4.2.1. E_b/I_0

Esta ecuación describe la relación Energía de bit a Interferencia y se define a continuación:

$$\gamma = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_i = \frac{W_O}{R_i} SIR_i \tag{4.1}$$

Donde:

SIR_i es la relación señal a interferencia del i-ésimo usuario.

R_i es la tasa de transmisión del i-ésimo usuario.

W_O es el ancho de banda.

4.2.2. Tasa de transmisión

A partir de la ecuación 4.1, se obtiene la tasa de transmisión. Ésta queda definida de acuerdo a la Ecuación 4.5

$$R_i = \begin{cases} (W_O/\gamma)SIR_i & \text{si} \quad SIR_i < m\gamma \\ \\ 2W_O & \text{si} \quad SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \tag{4.2}$$

Dado que en un sistema celular OFDMA se emplean 3 tipos de modulaciones m-arias: Q-PSK, 16-QAM Y 64-QAM, entonces dependiendo del tipo de modulación empleado, la tasa de transmisión quedará acotada de diferente manera, es decir m=2,4,8 para Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM respectivamente, donde m indica la dimensionalidad de la modulación.

Así cuando en la ecuación de R_i, m toma los valores antes mencionados se tienen las siguientes tres ecuaciones:

Para la modulación Q-PSK donde m=2:

$$R_i = \begin{cases} (W_O/\gamma)SIR_i & \text{si} \quad SIR_i < 2\gamma \\ \\ 2W_O & \text{si} \quad SIR_i \geq 2\gamma \end{cases} \tag{4.3}$$

Para la modulación 16-QAM donde m=4:

$$R_i = \begin{cases} (W_O/\gamma)SIR_i & \text{si} \quad SIR_i < 4\gamma \\ \\ 2W_O & \text{si} \quad SIR_i \geq 4\gamma \end{cases} \tag{4.4}$$

Para la modulación 64-QAM donde m=8:

$$R_i = \begin{cases} (W_O/\gamma)SIR_i & \text{si} \quad SIR_i < 8\gamma \\ \\ 2W_O & \text{si} \quad SIR_i \geq 8\gamma \end{cases} \tag{4.5}$$

De esta forma ya se tienen todos ya los casos para las diferentes modulaciones se emplean las diferentes modulaciones del sistema OFDMA. Cada uno de los cuales estos tres casos se incluyen en la simulación en MATLAB, debido a que cada uno de ellos refleja condiciones diferentes diferentes y arrojará por lo tanto resultados distintos.

4.2.3. SIR

Finalmente es necesario hablar de la SIR puesto que de este parámetro depende la tasa de transmisión para cada usuario. La SIR por definición se puede expresar según la ecuación 4.6 como el cociente de la potencia recibida (P_{Rx}) entre la interferecia recibida I_{Rx} para el i-ésimo usuario de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SIR_i = \frac{P_{Rx,i}}{I_{Rx,i}} = \frac{P_{tx,}u_\ell^{0,i}G(\phi_{0,i})/r_{0,i}^{\mu}10^{\zeta_{0,i}/10}}{\sum_{k=1}^{N_{bs}}P_{tx,}u_\ell^{k,i}G(\phi)_{k,i}/r_{k,i}^{\mu}10^{\zeta_{k,i}/10}} \tag{4.6}$$

Reordenando términos y simplificando, se tiene que la SIR es la que se muestra en la Ecuacion 4.7

$$SIR_i = \frac{P_{Rx,i}}{I_{Rx,i}} = \frac{G(\phi_{0,i})u_\ell^{0,i}/r_{0,i}^{\mu}10^{\zeta_{0,i}/10}}{\sum_{k=1}^{N_{bs}}G(\phi)_{k,i}u_\ell^{k,i}/r_{k,i}^{\mu}10^{\zeta_{k,i}/10}} \tag{4.7}$$

La Ecuación 4.7 es la ecuación de la SIR para cada usuario en el sistema celular OFDMA.

Donde:

$G(\phi_{0,i})$ es la ganancia de la antena del i-ésimo usuario respecto a la estación base cero.

$u_l^{0,i}$ son pérdidas causadas por *fast fading* (caídas rápidas) para el i-ésimo usuario respecto a la estación base cero y que son modeladas con variables aleatorias tipo Rayleigh.

$r_{0,i}^{\mu}10^{\zeta_{0,i}/10}$ son las pérdidas por propagación para el i-ésimo usuario respecto a la estación base cero, que son dadas por el producto de la μ-ésima potencia de la distancia $r_{0,i}$, que es la distancia entre el usuario de interés y la estación base cero y una componente log-normal $10^{\zeta_{0,i}/10}$, la cual representa las pérdidas por *shadowing* (oscurecimiento) y cuyas características están en función de la variable aleatoria Gaussiana ζ con media cero y desviación estándar Δ.

$G(\phi_{k,i})$ es la ganancia de la antena del i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base.

$u_l^{k,i}$ son pérdidas causadas por *fast fading* (caídas rápidas) para el i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base y que son modeladas con variables aleatorias tipo Rayleigh.

$r_{k,i}^{\mu}10^{\zeta_{k,i}/10}$ son las pérdidas por propagación para el i-ésimo usuario respecto a la k-ésima estación base, que son dadas por el producto de la μ-ésima potencia de la distancia $r_{k,i}$, que es la distancia entre el usuario de interés y la k-ésima estación base y una componente log-normal $10^{\zeta_{0,i}/10}$, la cual representa las pérdidas por *shadowing* (oscurecimiento) y cuyas características están en función de la variable aleatoria Gaussiana ζ con media cero y desviación estándar Δ.

4.2.4. Ganancia de la antena

El cálculo de la ganancia de la antena es un factor importante dentro de la expresión de la SIR, este cálculo se realiza tomando en cuenta que se utilizan antenas sectoriales. Es decir, en la simulación de la red celular OFDMA se utilizan antenas con una cobertura de 120° que genera 3 sectores por cada celda. El análisis de la antena fue hecho en [35], por lo que la ganancia de la antena $G(\phi)$, puede ser expresada como se muestra en la Ecuación 4.8. En la ecuación de la ganancia de la antena es crucial conocer el ángulo ϕ, pues es mediante este ángulo que se asignará la respectiva ganancia o pérdida según sea el caso.

$$G(\phi_{k,i}) = \begin{cases} 1 - \frac{1-q}{\theta^2}\phi^2 & \text{si} \quad |\phi_{k,i}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}}\theta \\ \\ p & \text{si} \quad |\phi_{k,i}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}}\theta \end{cases} \tag{4.8}$$

Donde ϕ es el ángulo entre el usuario de interés y la dirección de la máxima ganancia de la antena, q representa el nivel ganancia a θ radianes desde el cruce de un sector a la dirección de máxima ganancia y p representa el nivel de ganancia promedio normalizada para el lóbulo lateral.

Los valores para q y p son de -4dB y -15dB respectivamente, ya que estos valores corresponden a una antena típica en un sector celular de 120° con un ancho de haz de $-3dB$.

4.2.5. Patrones de reutilización de frecuencia utilizados

Se realizó la implementación de varios patrones de reutilización de frecuencia, estos patrones de reutilización se describen mediante la configuración NxSxK, donde N es el número de celdas que se encuentran en cada cluster, S es el número de sectores en cada celda y K es el número de bloques de frecuenicia en una celda.

El primer patrón de reuso que se implementó es el 1x3x1, el modelo de la red celular OFDMA que muestra esta forma de reuso se puede apreciar en la Figura 4.5, mediante este reuso se tiene que los *cluster* están formados por una celda, cada celda tiene tres sectores y hay un bloque de frecuencias. En este tipo de reuso todos los sectores utilizan el mismo bloque de frecuencia y además se considera que todos los sectores son interferentes al los sectores que pertenecen a la celda central, que es donde se generan los usuarios.

Otro patrón de reuso que también se implementó en la simulación es el 3X3X1, en el cual cada *cluster* está formado por 3 celdas, cada celda tiene 3 sectores sólo hay un bloque de frecuencia. Esta configuración de la red celular se aprecia en la Figura 4.6. En la figura es posible observar las celdas que son interferentes a la celda central.

Se implementó el reuso 1x3x3, en el cual cada una de las celdas forma un *cluster*, se tienen tres sectores por cada celda y en este caso se tienen 3 bloques de frecuencia, cada bloque es asignado a cada uno de los tres sectores. Esta configuración se observa en la Figura 4.7.

Como en este tipo de reuso se están manejando tres bloques de frecuencia, entonces se presentan tres casos de sectores interferentes a los sectores de la celda central, es decir para el caso del sector etiquetado como A, solo le serán interferentes los demás sectores etiquetados con A, este caso se observa en la Figura 4.8.

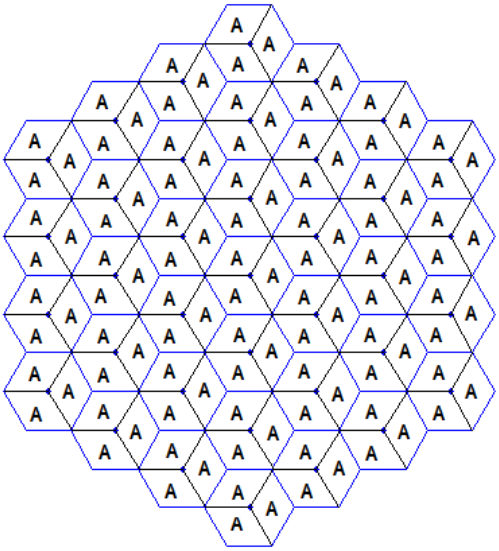

Figura 4.5: Red celular con el reuso 1x3x1.

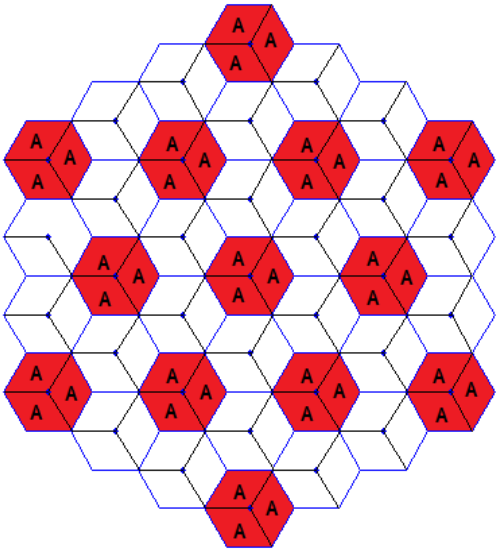

Figura 4.6: Red celular con el reuso 3x3x1.

El segundo caso surge al considerar al sector B, por lo que solo le serán interferentes los sectores que estén etiquetados con esta misma letra, este

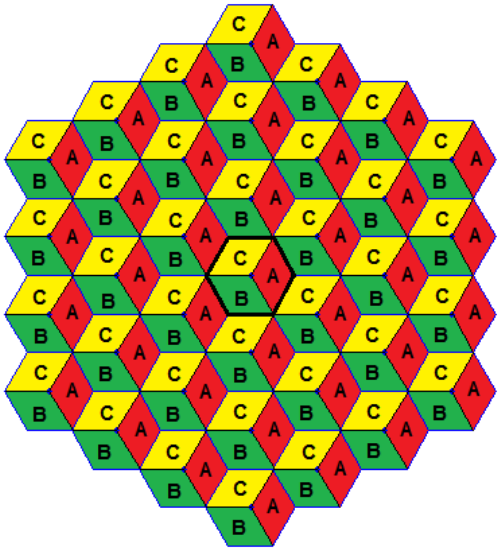

Figura 4.7: Red celular con el reuso 1x3x3.

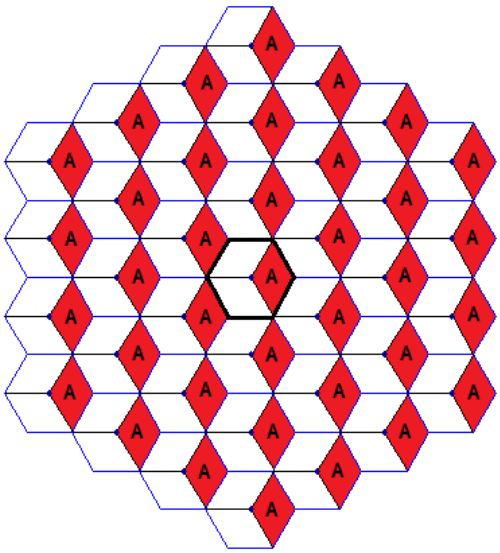

Figura 4.8: Red celular con el reuso 1x3x3, sector A.

caso se muestra en la Figura 4.9.

Finalmente el tercer caso del reuso 1x3x3 es al considerar los sectores

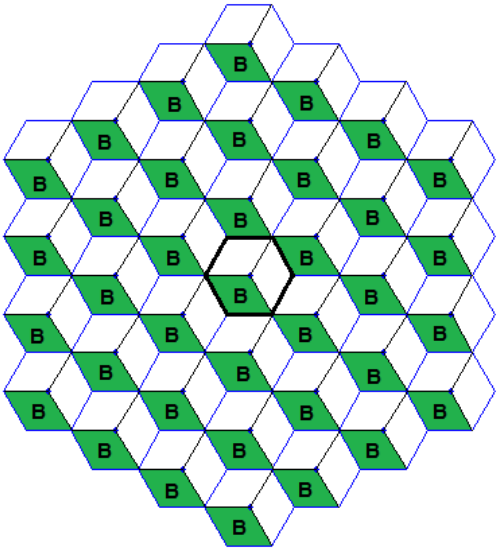

Figura 4.9: Red celular con el reuso 1x3x3, sector B.

interferentes al sector etiquetado como C, de la misma forma los sectores interferentes serán los demás sectores etiquetados como C. Este caso se muestra en la Figura 4.10.

Pasando ahora al patrón de reutilización 3x3x3, se tiene que se forman *cluster* con tres celdas, a su vez cada celda está dividida en tres sectores y se cuenta con tres bloques de frecuencia. En la Figura 4.11 se observan las celdas que son interferentes a la celda central y como se puede ver en esta ocasión el número de celdas interferntes es menor en comparación con el patrón de reúso 1x3x3.

Con este patrón de reúso se tienen tres casos, el primero de ellos es cuando se considera al sector A de la celda central, entonces nuevamente los sectores interferentes a éste, serán únicamente los sectores A, de las celdas interferentes a la celda central, este caso es mostrado en la Figura 4.12.

El segundo caso de este patrón de reúso surge al considerar ahora a los sectores interferentes del sector B de la celda central, los cuales serán únicamente los sectores B de las celdas interferentes a la celda central, esto se muestra en la Figura 4.13.

Para el tercer caso del patrón de reúso se deben considerar ahora a los sectores interferentes al sector C de la celda central, este caso se muestra en la Figura 4.14.

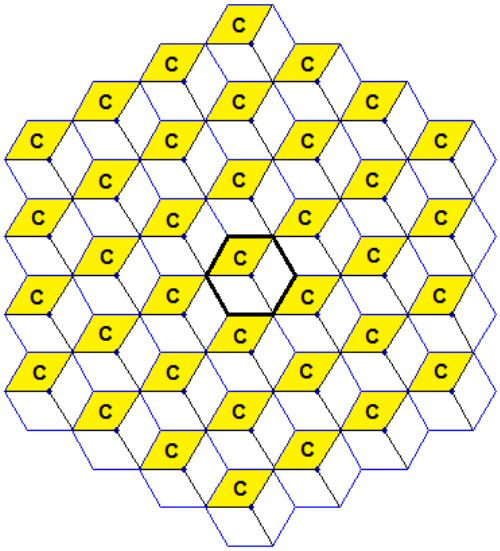

Figura 4.10: Red celular con el reuso 1x3x3, sector C.

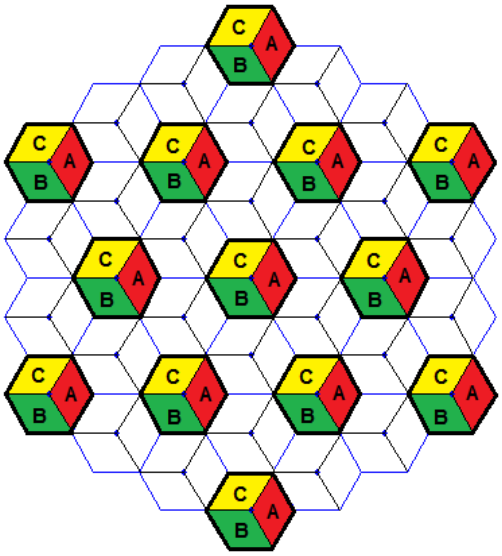

Figura 4.11: Red celular con el reuso 3x3x3.

Se implementó también el patrón de reutilización 4x3x1, en el cual cada *cluster* tiene cuatro celdas, cada celda está dividida en tres sectores y se

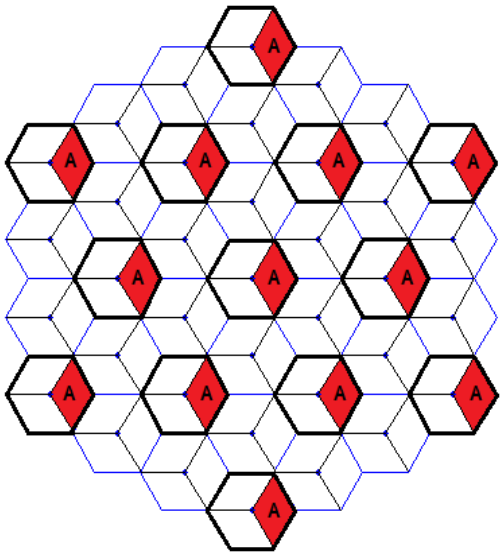

Figura 4.12: Red celular con el reuso 3x3x3, sector A.

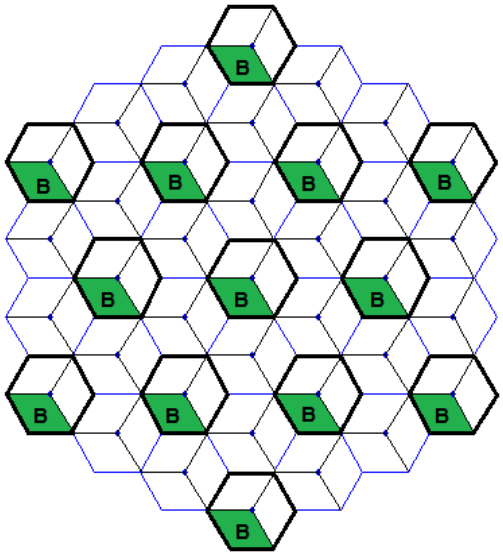

Figura 4.13: Red celular con el reuso 3x3x3, sector B.

cuenta con un bloque de frecuencia, lo que significa que todos los sectores utilizan este mismo bloque. Este patrón de reúso se observa en la Figura

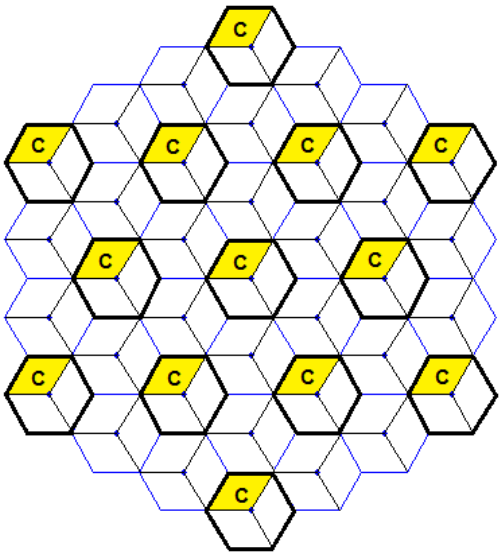

Figura 4.14: Red celular con el reuso 3x3x3, sector C.

4.15. Con este patrón de reúso es posible observar que el número de celdas interferentes es incluso menor que en el patrones 3x3x1 y 3x3x3.

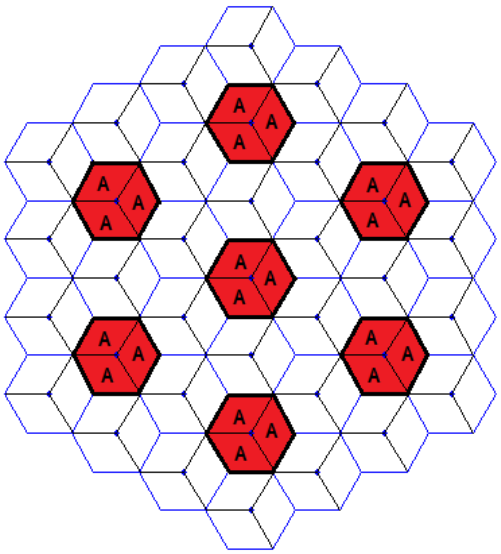

Figura 4.15: Red celular con el reuso 4x3x1.

Una variante del reúso 4, es el patrón 4x3x3, en el que a diferencia del patrón 4x3x1 se cuenta ahora con tres bloques de frecuencia por lo que cada sector utiliza un bloque diferente. Este patrón de reúso se observa en la Figura 4.16.

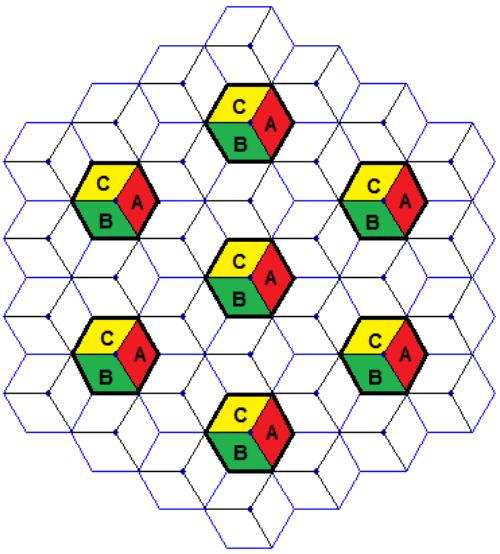

Figura 4.16: Red celular con el reuso 4x3x3.

Al utilizar este patrón de reúso surgen nuevamente tres casos, pues como cada sector utiliza un bloque de frecuencia diferente los sectores interferentes serán solamente los que estén etiquetados con la misma letra. Para el caso del sector A, en la Figura 4.17 se observan los sectores que le so interferentes.

En la Figura 4.18 se observan los sectores interferentes al sector B de la celda central de acuerdo al patrón 4x3x3.

En la Figura 4.19 se observan ahora los sectores que son interferentes al sector C de la celda central, del mismo patrón 4x3x3.

Finalmente se implementó el reúso 7 en dos variantes: el patrón 7x3x1 y el patrón 7x3x3. En la Figura 4.20 se observa el patrón 7x3x1 y es posible ver las celdas interferentes a la celda central.

En la Figura 4.21 se observa el patrón de reúso 7x3x3, en el que cada *cluster* tiene siete celdas, cada celda tiene tres sectores y se tienen tres bloques de frecuencia.

En el patrón de reúso 7x3x3, cada uno de los sectores de la celda central tiene sus propios sectores interferentes, así para el caso del sector A, los

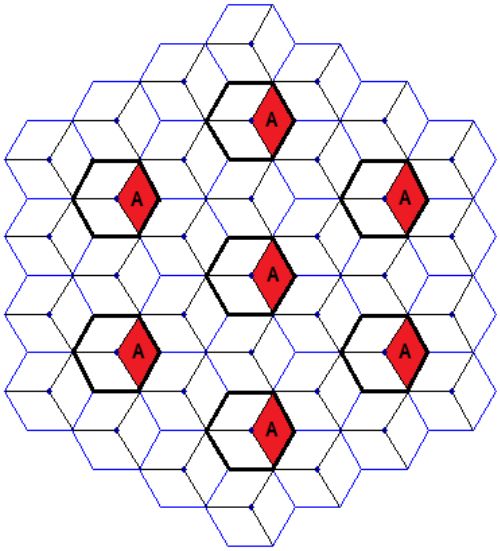

Figura 4.17: Red celular con el reuso 4x3x3, sector A.

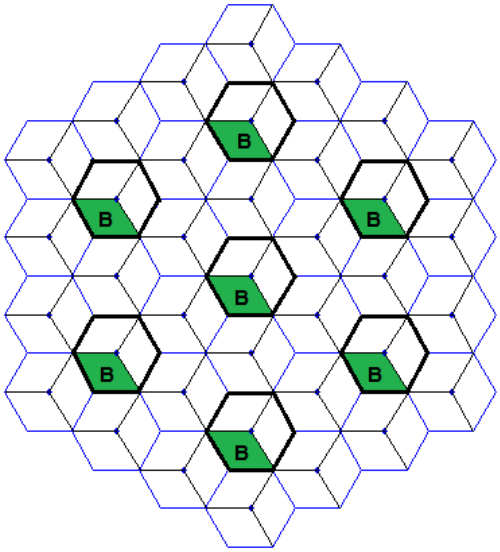

Figura 4.18: Red celular con el reuso 4x3x3, sector B.

sectores interferentes se observan en la Figura 4.22 que son todos los sectores etiquetados con A.

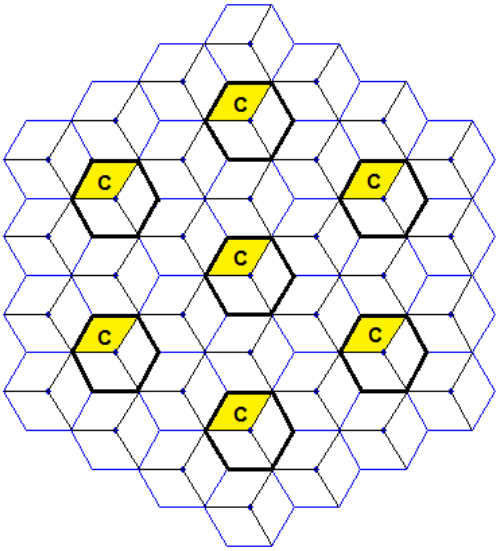

Figura 4.19: Red celular con el reuso 4x3x3, sector C.

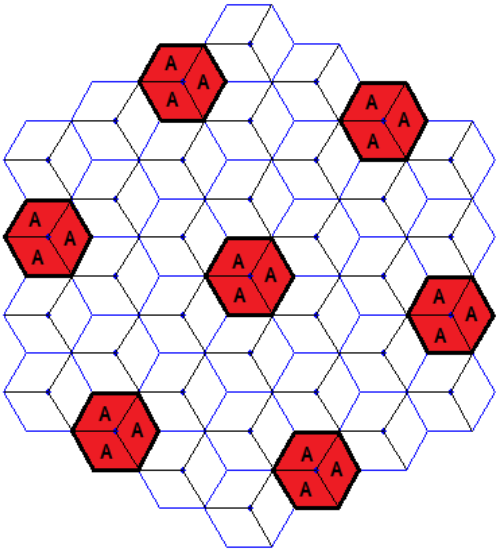

Figura 4.20: Red celular con el reuso 7x3x1.

Los sectores interferentes para el sector B del patrón de reúso 7x3x3 se observan en la Figura 4.23.

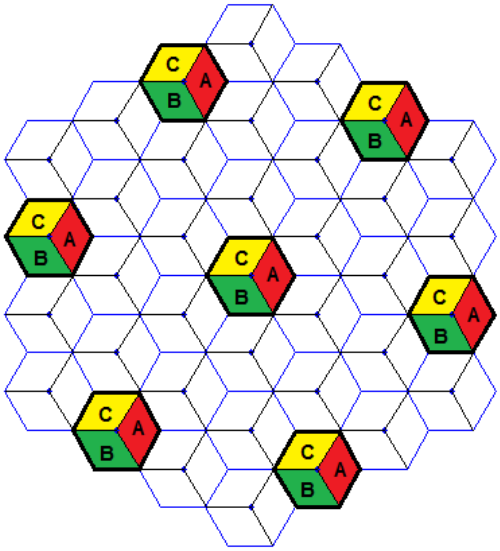

Figura 4.21: Red celular con el reuso 7x3x3.

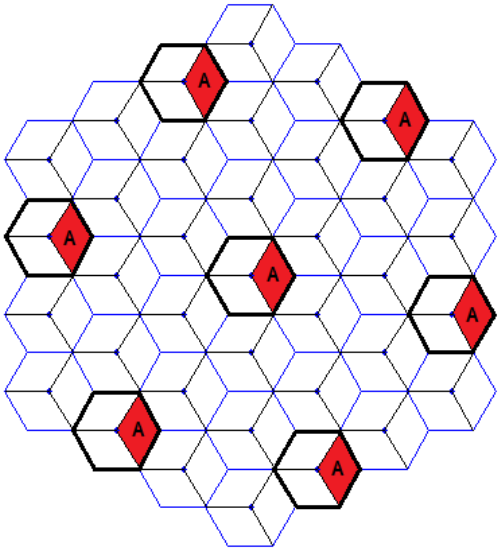

Figura 4.22: Red celular con el reuso 7x3x3, sector A.

Los sectores interferentes para el sector C del patrón de reúso 7x3x3 es posible observarlos en la Figura 4.24.

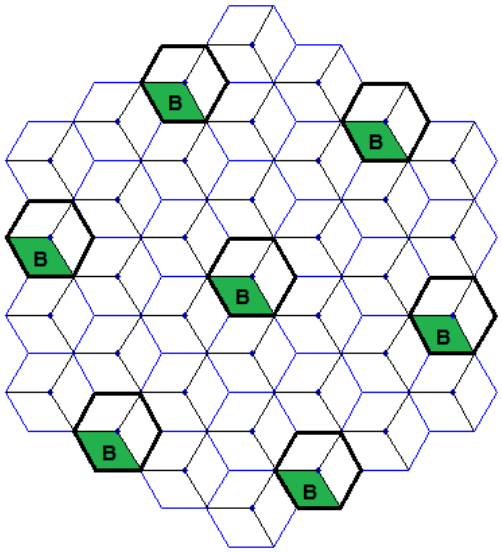

Figura 4.23: Red celular con el reuso 7x3x3, sector B.

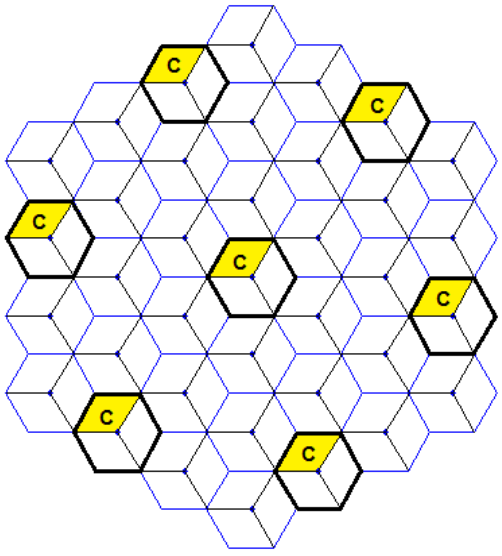

Figura 4.24: Red celular con el reuso 7x3x3, sector C.

Capítulo 5

Resultados y conclusiones

En este capítulo se mostrarán los resultados que se obtuvieron a través de la simulación en MATLAB así como también las conclusiones a las que se llegaron puesto que en la simulación se probaron diferentes escenarios en los cuales los resultados varían por lo que es importante realizar una comparación entre todos los resultados que se obtuvieron.

5.1. Resultados

Los resultados que se presentan en esta sección están en términos de *Throughput*, Tasa de bits e implícitamente en términos de la SIR. Es importante mencionar que un primer paso fue verificar que la simulación funcionaba de manera correcta por lo que se realizaron comparaciones de algunos resultados con los que se presentan [32] y se encontró que son muy similares, por lo que podemos decir que los resultados que se obtuvieron son confiables.

La primera gráfica que se muestra corresponde al patrón de reutilización 1x3x1, que ya se explicó en el capítulo anterior. En la Figura 5.1 se observa el desempeño del sistema el cual es medido en *b/seg*, se pueden observar tres líneas cada una de ellas corresponde a cada una de las modulaciones que el sistema OFDMA emplea. En esta gráfica se puede ver que el valor máximo está por encima de los 25 Mbps y esto se logra con la modulación 64-QAM, el valor mínimo para esta modulación es cercano a 9 Mbps. Para la modulación 16-QAM su valor máximo está arriba de los 17 Mbps y su valor mínimo es aproximadamente de 7 Mbps. Finalmente para la modulación Q-PSK, el valor máximo es de aproximadamente 11 Mbps y su valor mínimo está por

arriba de los 5 Mbps. Como se puede ver aunque con la modulación 64-QAM se tiene el valor más alto de *throughput* este valor máximo decae hasta 9 Mbps, es decir reduce un 65.05 %, en cambio para la modulación 16-QAM se tiene un porcentaje de degradación de 59.41 %, y para el caso de Q-PSK se tiene el menor porcentaje de degradación que es de 52.94 %.

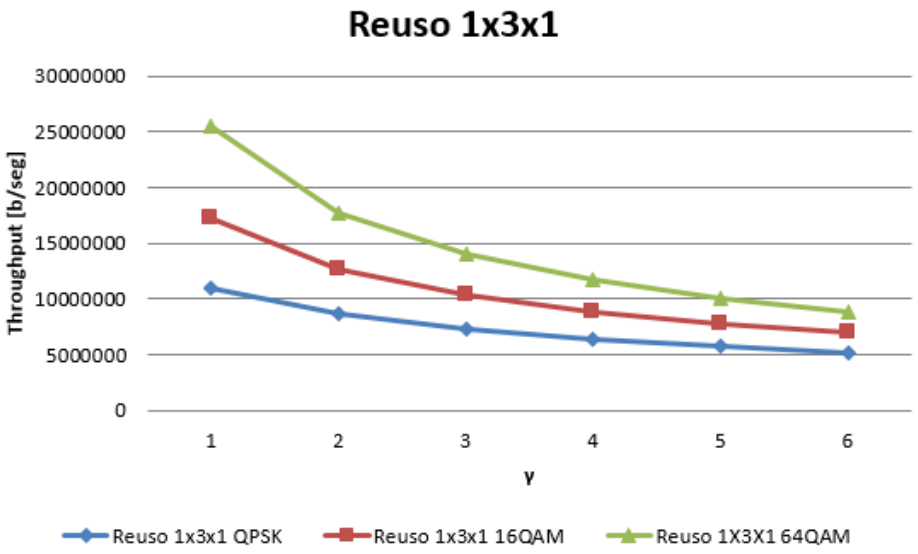

Figura 5.1: Throughput de la red celular con el reuso 1x3x1.

La siguiente gráficas muestran los resultados que se obtuvieron al implementar en la simulación del sistema el patrón de reúso 1x3x3. Al utilizar este patrón de reutilización se tiene que el *throughput* es medido en cada uno de los tres sectores ya que este patrón de reuso cuenta con tres bloques de frecuencia (A, B, C). En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se observan las gráficas obtenidas para los sectores A, B y C respectivamente. Los valores de *throughput* del sistema tienen un comportamiento similar para cada uno de los tres sectores, es decir, los valores máximos y mínimos son muy parecidos entre los sectores. Para la modulación 64-QAM se tiene que el valor máximo es de aproximadamente 46 Mbps y su valor mínimo es de aproximadamente 24 Mbps, es decir decae un 47 % aproximadamente. En cambio para la modulación 16-QAM el valor máximo es de aproximadamente 27 Mbps y su valor mínimo es de 16 Mbps con lo que el porcentaje de degradación es de 41 % y para la modulación Q-PSK se tiene un valor máximo de 15 Mbps y un valor

mínimo de 10 Mbps, es decir tiene una degradación del 34 %.

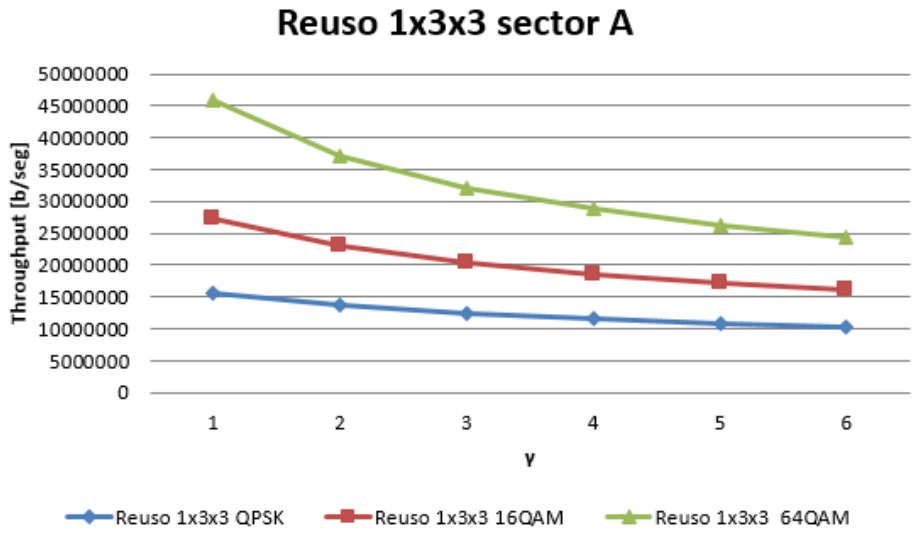

Figura 5.2: Throughput de la red celular con el reuso 1x3x3, sector A.

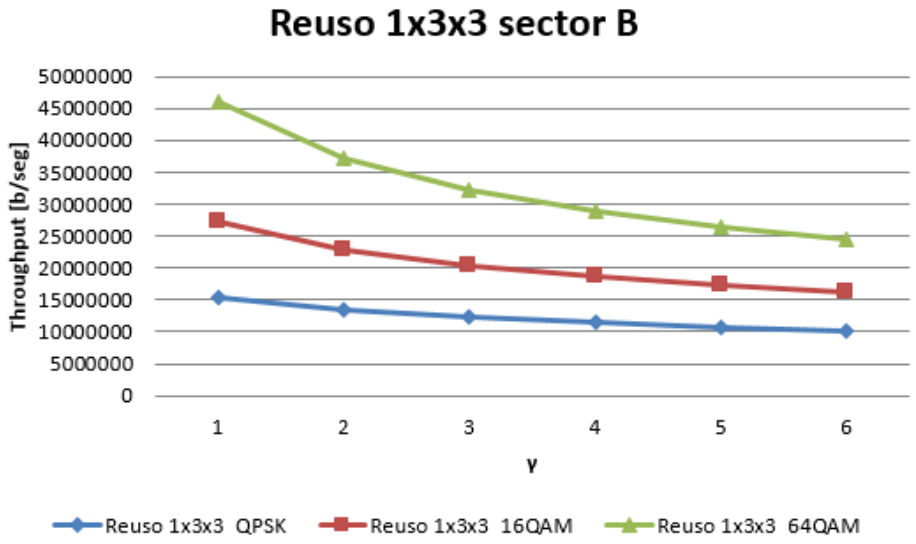

Figura 5.3: Throughput de la red celular con el reuso 1x3x3, sector B.

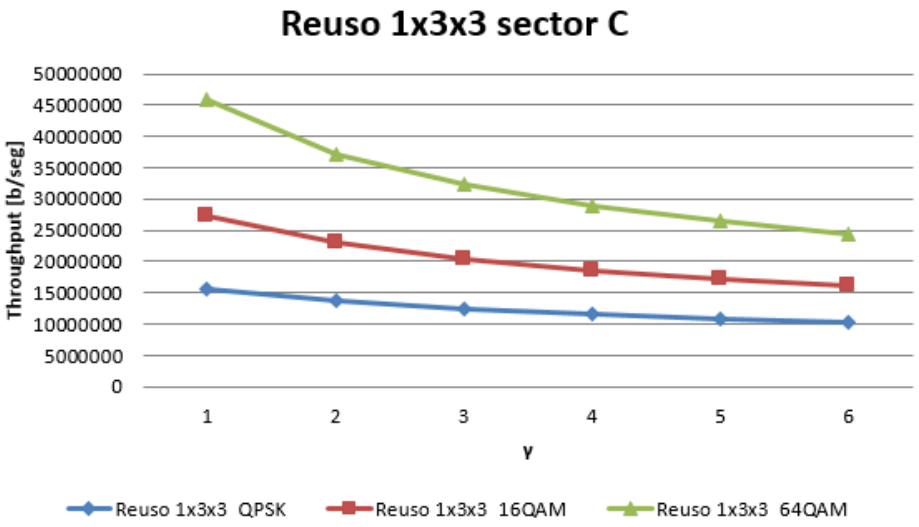

Figura 5.4: Throughput de la red celular con el reuso 1x3x3, sector C.

Todos estos resultados se muestran en la tabla 5.1, en la que se puede observar cuál es valor máximo de *Throughput*, el valor mínimo de *Throughput*, el valor promedio y además el porcentaje de degradación que existe en cada caso implementado.

En la Figura 5.5 se observan los resultados obtenidos cuando en la simulación se implementa el patrón de reuso 3x3x1. Como se puede ver es nuevamente con la modulación 64-QAM con la que se obtienen los valores más altos, para esta modulación se tiene un valor máximo de aproximadamente 42 Mbps y un valor mínimo de 18 Mbps, es decir decae en un 57.32 %. Para la modulación 16-QAM se tiene un valor máximo aproximado de 26 Mbps y un valor mínimo de 13 Mbps, con lo que se puede decir que decae un 49 %. Finalmente para la modulación Q-PSK se tiene que el valor máximo es de aproximadamente 15 Mbps y el valor mínimo es de 9 Mbps, es decir decae un 40 %.

En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se encuentran las gráficas pertenecientes al patrón de reutilización 3x3x3 para los sectores A, B y C, respectivamente. En estas gráficas se presenta el *throughput* que se obtuvo para cada uno de los sectores, se observa que los valores obtenidos en un sector son casi iguales a los valores obtenidos en los otros dos sectores. Con este patrón de reutilización el valor máximo obtenido con la modulación 64-QAM es de aproximadamente 63 Mbps y con un valor mínimo aproximado de 43 Mbps y un porcentaje de

Reuso	Modulación	*Throughput* [b/s]			Degradación (%)
		Val. Máx	Val. Mín.	Promedio	
1x3x1	QPSK	11,015,666.64	5,184,121.31	7,354,733.76	52.94
1x3x1	16-QAM	17,224,771.19	6,991,411.44	10,661,058.65	59.41
1x3x1	64-QAM	25,436,762.41	8,889,855.63	14,630,055.83	65.05
1x3x3, A	QPSK	15,544,962.54	10,214,842.68	12,355,284.30	34.29
1x3x3, A	16-QAM	27,302,441.21	16,082,702.73	20,438,099.55	41.09
1x3x3, A	64-QAM	46,033,977.38	24,321,192.69	32,461,257.30	47.17
1x3x3, B	QPSK	15,459,528.70	10,198,643.01	12,310,210.69	34.03
1x3x3, B	16-QAM	27,171,549.10	16,141,891.08	20,416,726.59	40.59
1x3x3, B	64-QAM	45,896,158.28	24,548,640.67	32,562,119.78	46.51
1x3x3, C	QPSK	15,480,506.39	10,219,323.23	12,334,900.56	33.99
1x3x3, C	16-QAM	27,232,655.07	16,136,735.66	20,446,139.11	40.74
1x3x3, C	64-QAM	45,998,431.38	24,470,931.49	32,556,606.75	46.80

Tabla 5.1. Throughput obtenido con el factor de reuso 1.

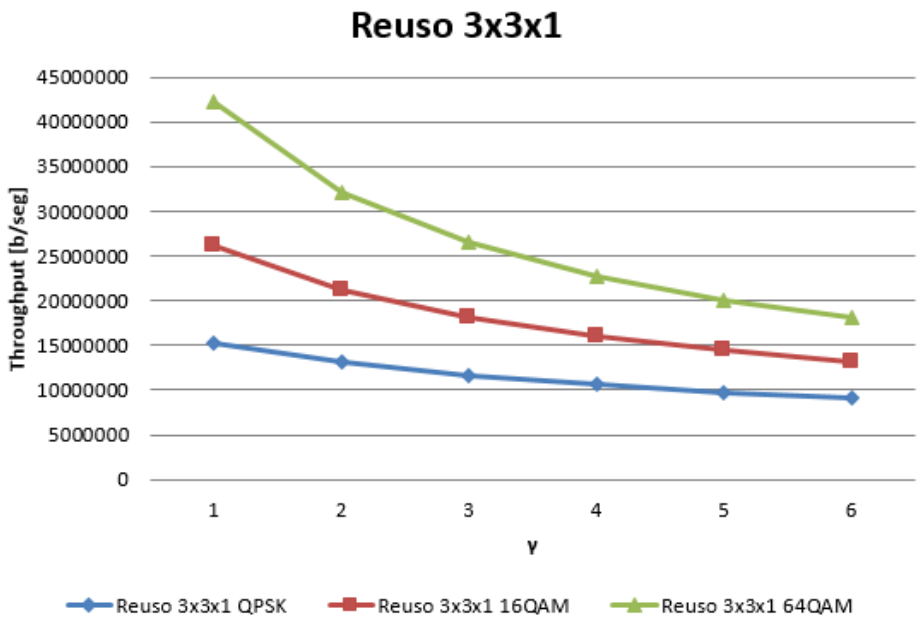

Figura 5.5: Throughput de la red celular con el reuso 3x3x1.

degradación de 32 %, para la modulación 16-QAM se tiene un valor máximo

de 34 Mbps y un valor mínimo de 25 Mbps, es decir reduce un 25 % y para la modulación Q-PSK se tiene un valor máximo de 18 Mbps y decae hasta tener un valor mínimo de 14 Mbps, lo que en términos de porcentaje corresponde a un 19 % aproximadamente. Estos resultados se resumen en la tabla 5.2.

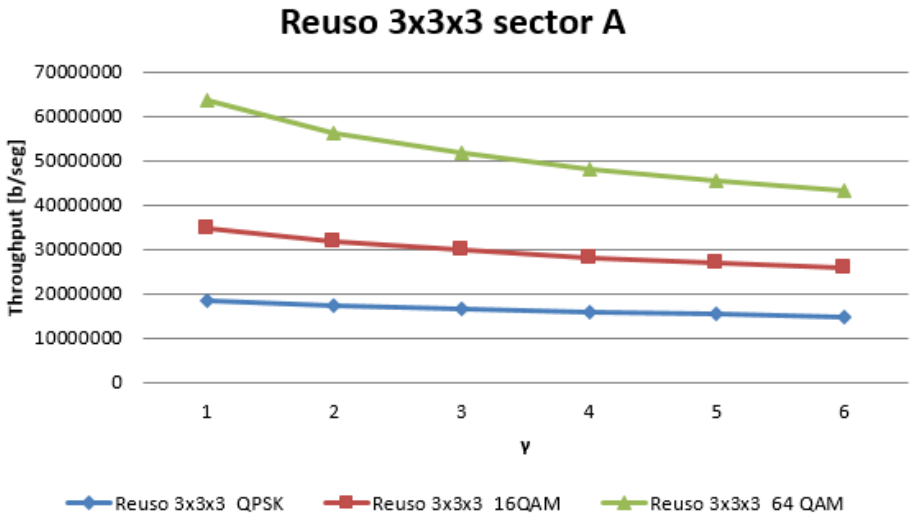

Figura 5.6: Throughput de la red celular con el reuso 3x3x3, sector A.

Otro patrón de reutilización que se implementó en la simulación es el 4x3x1, con la modulación 64-QAM el valor máximo es de aproximadamente 45 Mbps y el valor mínimo es de 29 Mbps, es decir, decae un 54.9 %. Para la modulación 16-QAM se tiene que el valor máximo es de aproximadamente 27 Mbps y el valor mínimo de 14 Mbps, es decir el porcentaje de degradación es de 46.6 %. Para la modulación Q-PSK se tiene un valor máximo de 15 Mbps y un valor mínimo de 9 Mbps, con lo que se dice que decae en un 37.7 %.

En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se observan los valores de *throughput* para el patrón de reutilización 4x3x3 para los sectores A, B y C. Se puede notar que los valores que la simulación arrojó para un sector son muy similares para los otros dos sectores restantes, por ejemplo para la modulación 64-QAM se tiene un valor máximo de 65 Mbps y un valor mínimo aproximado de 47 Mbps, con lo que se puede calcular que redujo un 27 %, para la modulación 16-QAM se tiene un valor máximo de 35 Mbps y un valor mínimo de 27 Mbps y un porcentaje de degradación de 21 % y para la modulación Q-PSK el máximo

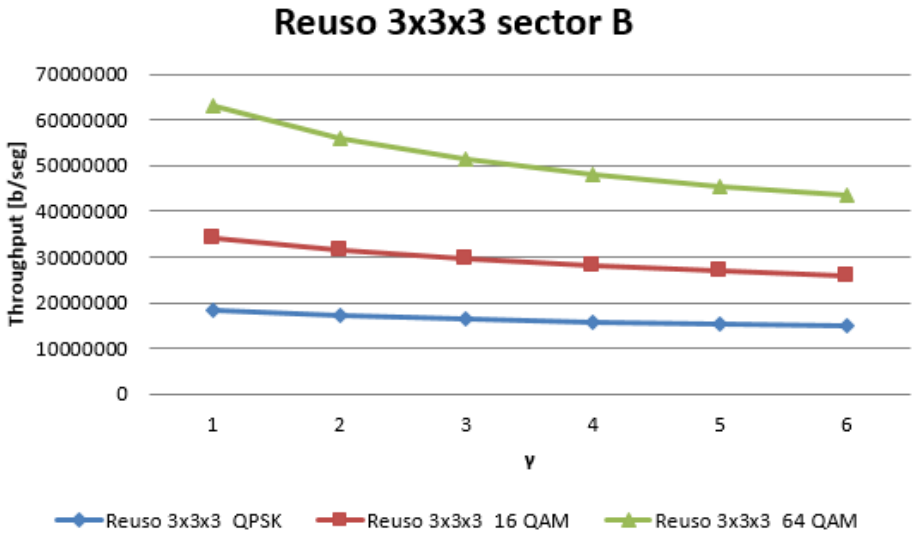

Figura 5.7: Throughput de la red celular con el reuso 3x3x3, sector B.

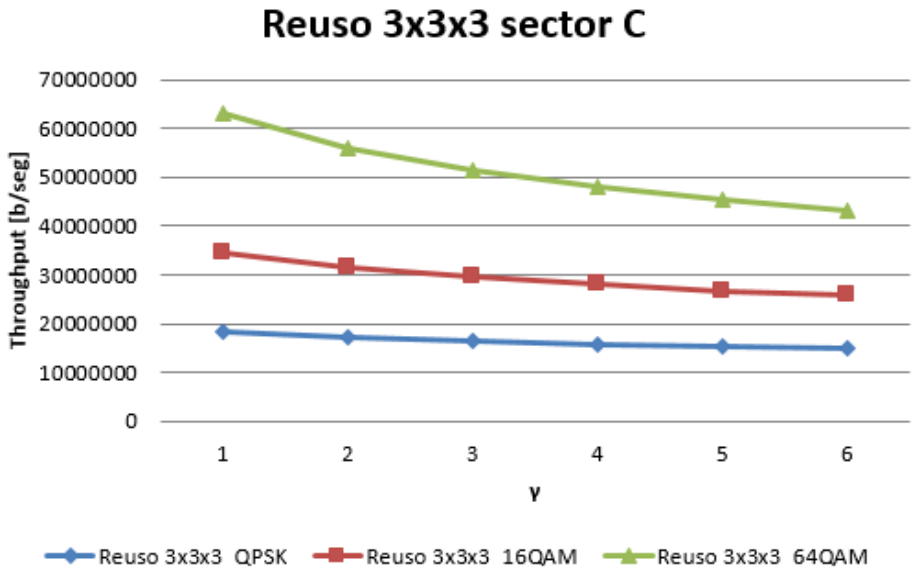

Figura 5.8: Throughput de la red celular con el reuso 3x3x3, sector C.

es aproximadamente de 18 Mbps y decae hasta 15 Mbps, en términos de porcentaje decimos que reduce un 16 %. Esto se observa en la tabla 5.3.

Reuso	Modulación	*Throughput* [b/s]			Degradación (%)
		Val. Máx	Val. Mín.	Promedio	
3x3x1	QPSK	15,242,082.99	9,070,695.95	11,560,513.77	40.49
3x3x1	16-QAM	26,156,369.90	13,246,392.33	18,206,530.04	49.36
3x3x1	64-QAM	42,328,275.60	18,065,468.36	26,981,707.11	57.32
3x3x3, A	QPSK	18,364,844.90	14,869,921.71	16,385,922.40	19.03
3x3x3, A	16-QAM	34,648,986.04	25,801,449.14	29,500,550.09	25.53
3x3x3, A	64-QAM	63,534,170.68	43,044,054.02	51,321,444.60	32.25
3x3x3, B	QPSK	18,168,805.14	14,765,641.27	16,228,379.27	18.73
3x3x3, B	16-QAM	34,257,620.79	25,771,187.46	29,311,530.19	24.77
3x3x3, B	64-QAM	62,944,988.50	43,335,955.03	51,269,901.47	31.15
3x3x3, C	QPSK	18,199,573.56	14,765,083.60	16,244,888.43	18.87
3x3x3, C	16-QAM	34,311,170.11	25,720,865.00	29,307,230.50	25.04
3x3x3, C	64-QAM	62,998,971.54	43,102,546.48	51,152,234.34	31.58

Tabla 5.2: Throughput obtenido con el factor de reuso 3.

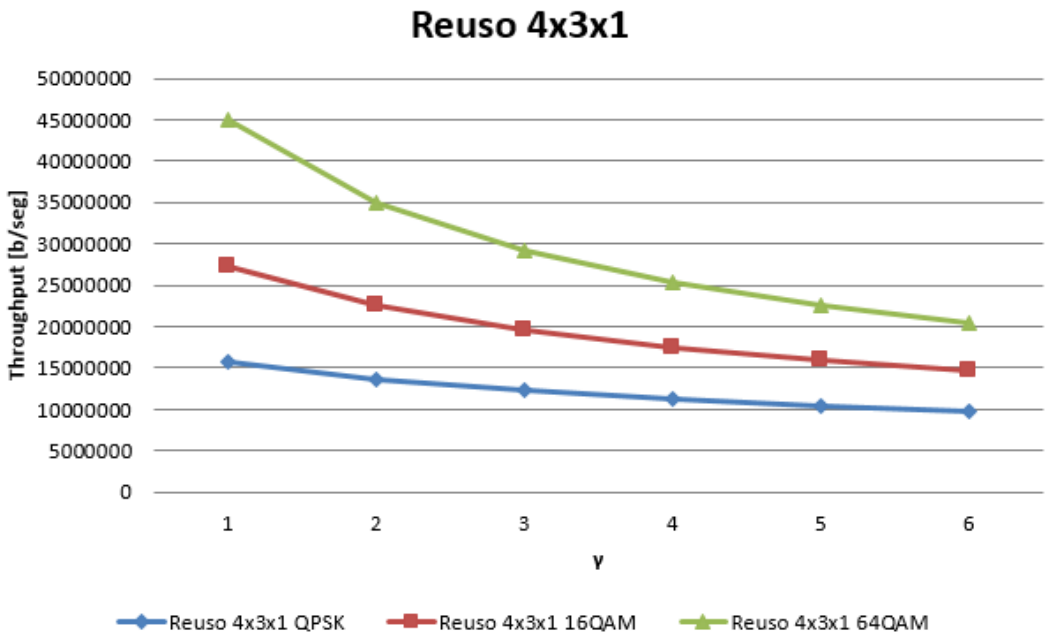

Figura 5.9: Throughput de la red celular con el reuso 4x3x1.

Finalmente se mostrarán los resultados al haber implementado los patro-

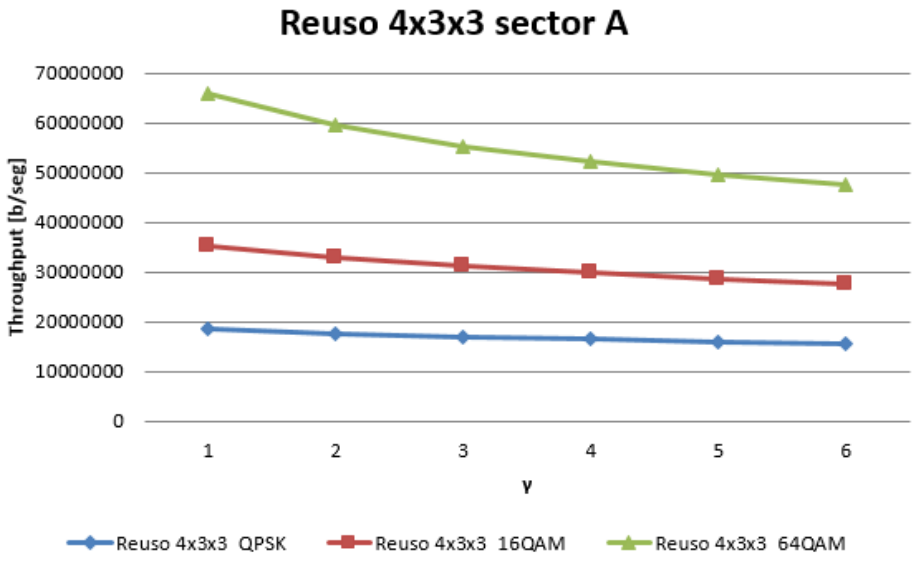

Figura 5.10: Throughput de la red celular con el reuso 4x3x3, sector A.

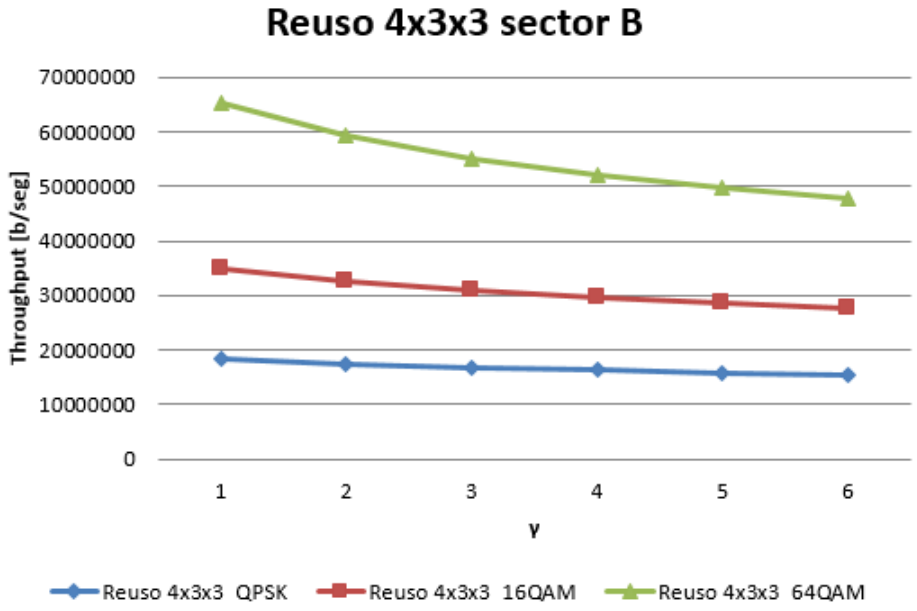

Figura 5.11: Throughput de la red celular con el reuso 4x3x3, sector B.

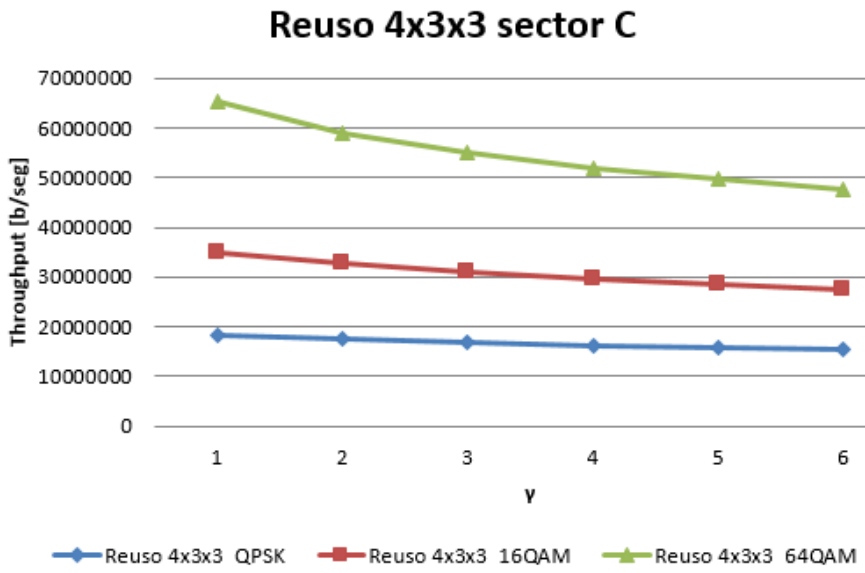

Figura 5.12: Throughput de la red celular con el reuso 4x3x3, sector C.

Reuso	Modulación	*Throughput* [b/s]			Degradación (%)
		Val. Máx	Val. Mín.	Promedio	
4x3x1	QPSK	15,707,920.90	9,783,505.95	12,200,477.83	37.72
4x3x1	16-QAM	27,357,647.62	14,587,505.41	19,562,620.96	46.68
4x3x1	64-QAM	45,091,170.18	20,335,863.11	29,560,327.10	54.90
4x3x3, A	QPSK	18,588,874.14	15,570,472.48	16,883,121.58	16.24
4x3x3, A	16-QAM	35,384,672.43	27,656,930.77	30,910,920.63	21.84
4x3x3, A	64-QAM	65,817,875.75	47,575,221.31	55,005,824.23	27.72
4x3x3, B	QPSK	18,386,938.37	15,444,304.49	16,710,070.89	16.00
4x3x3, B	16-QAM	34,976,045.24	27,575,728.79	30,680,929.95	21.16
4x3x3, B	64-QAM	65,142,046.79	47,764,928.83	54,854,881.08	26.68
4x3x3, C	QPSK	18,420,744.72	15,428,465.96	16,720,595.51	16.24
4x3x3, C	16-QAM	35,029,706.32	27,507,369.92	30,656,363.57	21.47
4x3x3, C	64-QAM	65,170,230.60	47,529,642.34	54,717,659.60	27.07

Tabla 5.3: Throughput obtenido con el factor de reuso 4.

nes de reúso 7x3x1 y 7x3x3. En la Figura 5.13 se observan los resultados respecto al patrón de reúso 7x3x1, en dicha gráfica puede notar que con la modulación 64-QAM el valor máximo es de 47 Mbps mientras que el valor

mínimo es de 22 Mbps, es decir redujo un 52.2 %, para la modulación 16-QAM el valor máximo es de aproximadamente 28 Mbps y el valor mínimo es de 15 Mbps, en términos de porcentaje decimos que decae un 43.9 % y para la modulación Q-PSK se oberva un valor máximo de 16 Mbps y un valor mínimo de 10 Mbps, y un porcentaje de degradación del 35 %.

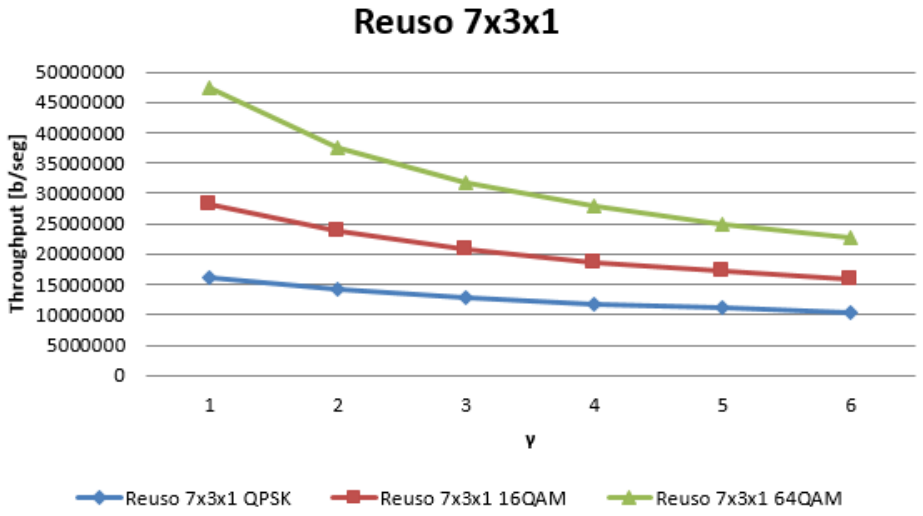

Figura 5.13: Throughput de la red celular con el reuso 7x3x1.

Los resultados respecto al patrón de reúso 7x3x3 se muestran en las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16, respecto a los sectores A, B y C, donde es posible observar que los valores arrojados por la simulación para un sector, son similares a los valores para los otros dos sectores. En la tabla 5.4 se observa la comparación de estos resultados. Es posible observar que los valores más altos son alcanzados con la modulación 64-QAM que arroja valores en el rango de 67 Mbps a 51 Mbps, es decir decae solamente 24 %. Los valores obtenidos con 16-QAM estan dentro del rango de 35 Mbps como máximo a 29 Mbps como mínimo, decayendo un total de 19 % aproximadamente, finalmente para el caso de Q-PSK se tienen valores que van de 18 Mbps hasta 16 Mbps, es decir solo varían por 2 Mbps entre el máximo y el mínimo, por lo que el porcentaje de degradación es de solamente 14 %.

5.2. Conclusiones

Con esta simulación se obtuvieron resultados importantes acerca del desempeño de una red celular OFDMA para el enlace de bajada (*downlink*) pues este es el enlace limitante; despues de analizar cada uno de los casos de reuso implementados es posible concluir que en los casos que se utilizaron 3 bloques de frecuencia (1x3x3, 3x3x3, 4x3x3 y 7x3x3) se obtuvieron valores más altos de throughput en comparación a los casos en los que se utiliza el mismo bloque de frecuencia para los 3 sectores (1x3x1, 3x3x1, 7x3x1). Númericamente los valores más altos de thropughput dentro de los casos con un solo bloque de frecuencia corresponden al reuso 7x3x1 y con la modulación 64-QAM con el cual se alcanzaron valores que van de los 47 Mbps como máximo a los 22 Mbps como mínimo. Mientras que al utilizar 3 bloques de frecuencia se alcanzaron valores mucho más altos, de hecho con el patrón de reuso 7x3x3 y la modulación 64-QAM se tiene un valor máximo de 67 Mbps y un valor mínimo de 51 Mbps.

Hablando desde la perspectiva de modulaciones se encontró que en todos los casos implementados en la simulación, los valores más altos de throughput fueron alcanzados siempre con la modulación 64-QAM, por ejemplo con el reuso 7x3x3 se tienen en promedio 57 Mbps, para el caso 4x3x3 se tienen en promedio 55 Mbps, para el caso 3x3x3 se tienen 51 Mbps y para el caso 1x3x3 se tienen 32 Mbps. En segundo lugar están los valores arrojados por la modulación 16-QAM la cual para el caso de 7x3x3 ofrece en promedio 31 Mbps, para el caso 4x3x3 se tienen 30 Mbps, para el caso 3x3x3 se tienen 29 Mbps y para el caso 1x3x3 se tienen solamente 20 Mbps. Finalmente en tercer lugar están los valores obtenidos con la modulación Q-PSK en la cual se alcanzan los valores más bajos, por ejemplo para el caso 7x3x3 se tienen en promedio 17 Mbps, para el caso 4x3x3 se tienen 16 Mbps en promedio, para el caso 3x3x3 se tienen 16 Mbps y para el caso 1x3x3 solamente se tienen 11 Mbps.

Hablando en términos de porcentajes podemos decir que el porcentaje de degradación entre el valor máximo alcanzado y el valor mínimo depende en primer lugar del reuso y en segundo lugar del tipo de modulación. Fue posible observar que los menores porcentajes de degradación corresponden al reuso 7x3x3 donde con la modulación 64-QAM se tiene un porcentaje de degradación solamente de 23 %, para el caso de la modulación 16-QAM se tiene un porcentaje de degradación de 19 % y para la modulación Q-PSK se tiene un porcentaje de 14 %. En este mismo caso a su vez es posible observar

también que con la modulación 64-QAM se tiene un mayor porcentaje de degradación respecto a las otras dos modulaciones. Con los demás patrones de reuso implementados se obtuvieron porcentajes de degradación más altos, de hecho con el patrón de reuso 1x3x1 se obtuvieron los mayores porcentajes, para 64-QAM se obtuvo un 65 %, para 16-QAM un 59 % y para Q-PSK un 52 %. Estos valores nos indican una tasa de cambio más abrupta entre el valor máximo y mínimo obtenidos en este patrón de reuso.

Finalmente hay que decir que los valores más altos de throughput fueron alcanzados con el patrón de reuso 7x3x3 y el 4x3x3, con los que se alcanzó el valor más alto de throughput es cual supera los 65 Mbps y teniendo como valor mínimo aproximadamente 50 Mbps, esto con la modulación 64-QAM, es decir en promedio de tienen aproximadamente 55 Mbps, y en cuanto al porcentaje de degradación está entre 24 y 27 %.

También es importante recalcar que si bien es cierto que los mejores valores de throughput fueron obtenidos con la modulación 64-QAM, esto representa un costo en el incremento de la complejidad del sistema en términos de latencia de datos.

Con cada uno de los patrones de reuso empleados en esta simulación se obtuvieron valores diferentes, pues cada uno representa una respuesta diferente al sistema tomando en cuenta la interferencia y la capacidad del sistema. Básicamente el incremento o decremento de estos valores de throughput depende del reuso y el tipo de modulación empleado.

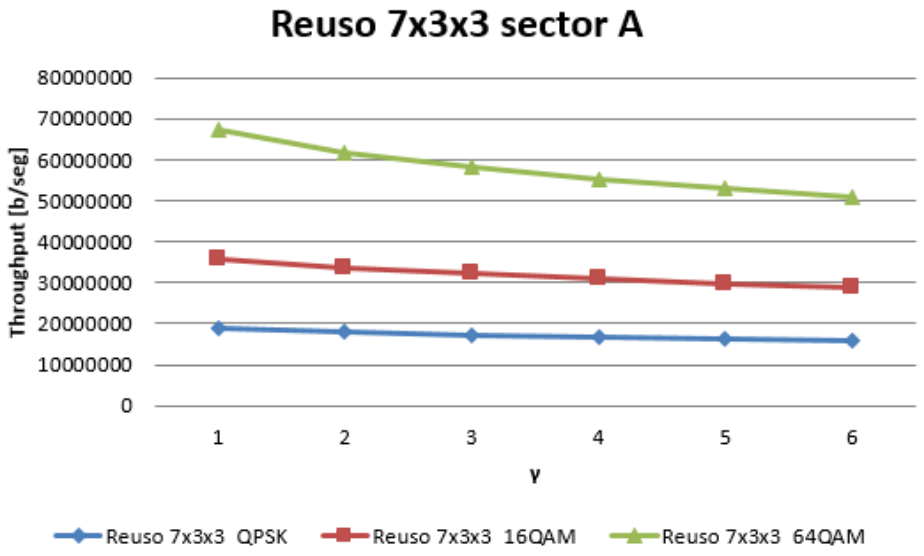

Figura 5.14: Throughput de la red celular con el reuso 7x3x3, sector A.

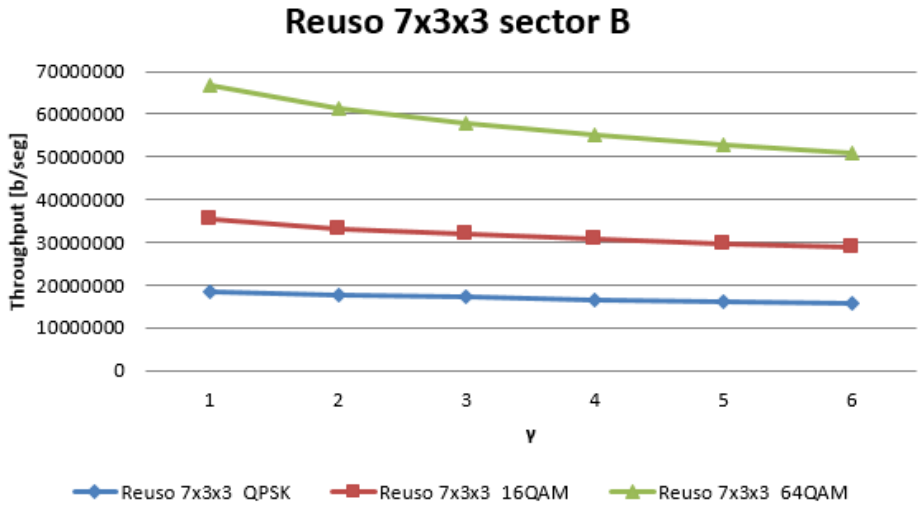

Figura 5.15: Throughput de la red celular con el reuso 7x3x3, sector B.

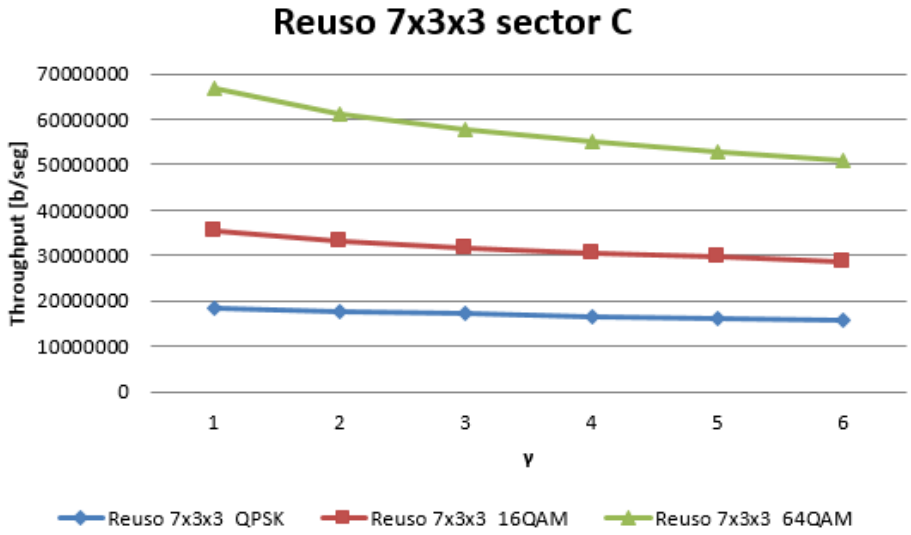

Figura 5.16: Throughput de la red celular con el reuso 7x3x3, sector C.

Reuso	Modulación	*Throughput* [b/s]			Degradación (%)
		Val. Máx	Val. Mín.	Promedio	
7x3x1	QPSK	16,026,232.59	10,400,833.56	12,716,843.14	35.10
7x3x1	16-QAM	28,269,040.68	15,848,553.68	20,745,137.53	43.94
7x3x1	64-QAM	47,391,498.07	22,635,509.08	31,976,648.49	52.24
7x3x3, A	QPSK	18,740,004.36	16,082,586.81	17,239,691.88	14.18
7x3x3, A	16-QAM	35,898,997.35	29,037,794.83	31,943,827.80	19.11
7x3x3, A	64-QAM	67,458,727.26	51,073,436.13	57,777,848.21	24.29
7x3x3, B	QPSK	18,524,482.72	15,912,544.39	17,035,903.27	14.10
7x3x3, B	16-QAM	35,446,527.58	28,867,808.14	31,633,049.22	18.56
7x3x3, B	64-QAM	66,642,900.38	51,098,221.22	57,455,142.73	23.33
7x3x3, C	QPSK	18,555,105.08	15,894,445.89	17,041,534.68	14.34
7x3x3, C	16-QAM	35,491,357.81	28,811,438.33	31,609,346.00	18.82
7x3x3, C	64-QAM	66,641,704.97	50,918,195.37	57,341,736.88	23.59

Tabla 5.4: Throughput obtenido con el factor de reuso 7.

Bibliografía

[1] R. Esmailzadeh y M. Nakagawa, *TDD-CDMA for the 4th Generation of Wireless Communications*, IEEE Wireless Commun., Agosto 2003.

[2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., 2a Ed., 2002.

[3] Shiying Han, Ying-Chang Liang and Boon-Hee Soong, *Spectrum Refarming for OFDMA Small Cells Overlaying CDMA Cellular Networks*, Nanyang Technological University, 2014.

[4] http://www.statista.com/statistics/274774/forecast-of-mobile-phone-users-worldwide/

[5] http://www.poderpda.com/editorial/mercado-movil-en-mexico-2015/

[6] Muñoz Rodríguez, David *Sistemas Inalámbricos de comunicación personal*, Marcombo, 2002, pág. 1-30.

[7] Rodríguez Gamez Orlando. Hernández Perdomo, Reynaldo. *Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas*, Red de Revistas científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. Versión electrónica. Vol. XI, núm. 1, enero-marzo 2005, págs 1-8

[8] De Bernardo González César Mártin, Priede Bergamini Tiziana, *Marketing móvil: una nueva herramienta de comunicación*, Netbiblio, 2007

[9] Ghe. Voinea, Jorge, *Redes de Comunicaciones. Administración y Gestión*, Fylred Radiocomunicaciones, 2012, págs. 167-168.

[10] Cárdenas Páez, José Joel. *Seminario de Titulación, Procesamiento Digital de Señales, Redes de Comunicación 4G WiMAX.*, Instituto Politécnico Nacional. 2009, págs. 4-12.

[11] http://www.tendencias21.net/Tecnologia-4G-la-nueva-evolucion-de-la-telefonia-celular.html

[12] Sitio web:http://www.ecured.cu/index.php/Tecnología4G

[13] http://www.ecured.cu/index.php/WiMAX

[14] Calle Cáceres, Camilo Iván. *Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4G Long Term Evolution (LTE) y LTE-advanced.*, Escuela Politécnica Nacional. Quito, 2013, págs. 25-40.

[15] Gohil, Asvin. Modi, Hardik, K. Patel, Shobhit. *5G Technology of Mobile Communication: A Survey*, International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), IEEE,2013. págs. 288-292.

[16] http://www.20minutos.es/noticia/1812021/0/samsung/servicio-movil/quinta-generacion/

[17] García Jiménez, J. *Telecomunicaciones móviles. Capítulo 15. Acceso Múltiple en Sistemas de Comunicaciones Personales*, Marcombo. España, 1998, págs. 153-159.

[18] Hernández Magro, Juan José Gaytán *Sistemas Inalámbricos de Comunicación Personal. Capítulo 3. Acceso Múltiple por División de código*, Alfaomega. México, 2002, págs. 85-92.

[19] S. Tanenbaum, Andrew *Redes de computadoras*. 4a.edición. Pearson. México, 2003, págs. 162-168.

[20] Sallent Roig, Oriol. Pérez Romero, Jordi. *Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles celulares*. Universitat Politécnica de Catalunya. UPC. Barcelona, España, 2014, págs. 150-156.

[21] Sallent Roig, Oriol. Valenzuela González, José Luis. Agustí Comes, Ramón. *Principios de Coumunicaciones Móviles*. Universitat Politécnica de Catalunya. UPC. Barcelona, España, 2003, págs. 118-203.

[22] Sallent Roig, Oriol. Valenzuela González, José Luis. Agustí Comes, Ramón. *Principios de Coumunicaciones Móviles*. Universitat Politécnica de Catalunya. UPC. Barcelona, España, 2003, págs. 106-130.

[23] http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/multi/tdma.htm

[24] http://electronicdesign.com/communications/fundamentals-communications-access-technologies-fdma-tdma-cdma-ofdma-and-sdmaTDMA

[25] Huidobro Moya, José Manuel. Conesa Pastor, Rafael. *Sistemas de Telefonía*. 5a. ed. Editorial Paraninfo. España, 2006, 491 págs.

[26] R. Figueiras, Aníbal. *Una panorámica de las telecomunicaciones*. Editorial Pearson Educación. España, 2002, 394 págs.

[27] Enríquez, Andrés. Hamilton Ortiz, Jesus. Taha Ahmed, Bazil. *Banda Ancha Inalámbrica*. Editorial OmniaScience. España, 2014, 170 págs.

[28] Sallent Roig, Oriol. Valenzuela González, José Luis. Agustí Comes, Ramón. *Principios de Coumunicaciones Móviles*. Universitat Politécnica de Catalunya. UPC. Barcelona, España, 2003, 223 págs.

[29] Plaza, Crisanto. *Ensayo sobre la regulación tecnológica: la era digital en Europa*. Grupo Editorial España. España, 2014, 720 págs.

[30] Cardona, Narás. Olmos, Juan José. García, Mario. F. Monserrat, José. *3GGP LTE: Hacia la 4G móvil*. Marcombo. Barcelona, 2011, 456 págs.

[31] $http://www.rfwireless-world.com/Articles/OFDM_versus_OFDMA.html$

[32] C. Yang, Samuel. *OFDMA System Analysis and Design*, Artech House, USA, 2010. 319 págs.

[33] F. Bonilla, Jonny. E. Gallardo, Antonio. A. Quinatoa, Carlos. *Estándar 802.16 y WiMax*. Escuela Politécnica Nacional (EPN), Facultad de Ingeniería Elétrica y Electrónica. 2013.

[34] Cordero Limón, Miguel. *Técnicas de estimación en la capa física Wireless-OFDM de la norma IEEE 802.16e*. Ingeniería de telecomunicación. Escuela superior de ingenieros. Departamento de teoría de la señal y comunicaciones. Mayo, 2009.

[35] Castañeda-Camacho Josefina, Mino-Aguilar Gerardo, Cortez Liliana, Gutiérrez Arias José Eligio Moisés, Guerrero- Castellanos José Fermi, Muñoz-Hernández Germán Ardul. *A Montercarlo Simulation Applied*

to Measurement of the impact of the smart antenna technology in digital celular systems, Electronic Department of Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Revista de Ingeniería Investigación y Tecnología UNAM, volumen XVI (número 2), abril-junio 2015. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

[36] Haykin, Simon. Moher, Michael. *Introduction to analog and digital communications*. 2da. Ed. E. U. A., 2007. 537 págs.

[37] G. Proakis, John. *Digital Communications*. 5ta. Ed. Mc. Grow-Hill. ISBN: 0-07-295716-6. New York, 2008. 1170 págs.

[38] Huidobro, Jose Manuel. *Antenas de Telecomunicaciones*, Revista Digital de ACTA, 2013.

[39] Cardama Aznar, Ángel. Jofre Roca, Lluís. Rius Casals, Juan Manuel. Romeu Robert, Jordi. Blanch Boris, Sebastián. Ferrando Bataller, Miguel. *Antenas*. Universitat Politécnica de Catalunya. Barcelona, España, 2004. 460 págs.

[40] L. Stutzman, Warren. A. Thiele, Gary. *Antena Theory and design*. ISBN: 978-0-470-57664-9. E.U.A., 2013.

Apéndice A

Código en MATLAB

```
    % Generación del modelo de la red celular
L = linspace(0,2*pi,7);
R = input('valor del radio: ');
xv = R*cos(L);
yv = R*sin(L);
a = R*sin(L(2));

    CY = a.*[0,2,4,6,-2,-4,-6];
LCY = length(CY);
CX = zeros(1,LCY);
LCx=length(Cx);
LCy=length(Cy);
for n=1:LCx
xv = Cx(n)+R*cos(L);
yv = Cy(n)+R*sin(L);
plot(xv,yv);
axis equal
axis([-8000 8000 -8000 8000])
end
% Generación de usuarios aleatorios
m=50000;
RX = -R+(R-(-R)).*rand(1,m);
RY = -a+(a-(-a)).*rand(1,m);
in = inpolygon(RX,RY,XV,YV);
plot(RX(in),RY(in),'red *');
```

```
% Cálculo de distancias, path-loss, y elementos para la SIR
for j=1:37;
x2=ones(1,x1L)*Cx(j);
y2=ones(1,y1L)*Cy(j);
d2=sqrt(((x2-x1).^2)+(y2-y1).^2); D(:,j)=d2;
end

    mu = 4;
M = 0;
Dmu = DA.^mu;
DE = 10.^(8/10);
R = M + DE.*randn(x1L,111);
LOG = 10.^(R/10);
Lp =1./(LOG.*Dmu);
B=10;
Rayl=raylrnd(B,x1L,111);
%- - - -
```

```
    elseif (OrigenNX(m1,m0)< 0) & & (OrigenNY(m1,m0) < 0)
angulo01= ((180*pi)/180) + angrad;
angulo02= ((360*pi)/180) - angulo01;
if angulo01 ¡ angulo02
angulo0=angulo01;
else
angulo0=angulo02;
end
angulo120 = ((60*pi)/180) + angrad;
angulo240 = abs (((60*pi)/180) - angrad);
else
angulo0 = angrad;
angulo1201 = ((120*pi)/180) + angrad;
angulo1202 = ((360*pi)/180) - angulo1201;
if angulo1201 < angulo1202
angulo120=angulo1201;
else
angulo120=angulo1202;
end
angulo240 = ((120*pi)/180) - angrad;
end
%- - - -
```

```
Gang240(m1,m0) = 1-(((1-q)/(theta^2))*(Ang240(m1,m0)^2));
else
Gang240(m1,m0) = p;
end
end
end
% - - -
```