



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
PUEBLA**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**“Diseño de una plataforma de simulación para la  
evaluación del desempeño de un sistema celular  
OFDMA con estaciones base móviles ”**

Tesis presentada para obtener el título de:

**Licenciado en Electrónica**

Presenta:

**Juan Carlos Villegas Hernández**

Asesores:

**Dra. Josefina Castañeda Camacho**

**Dra. Liliana Cortez**

**Junio de 2018**

# Agradecimientos

A mis padres por siempre creer en mí, porque su apoyo y sacrificios hoy son culminados en este trabajo de tesis.

A mis hermanas por apoyarme siempre que lo necesitaba.

A la Dra. Josefina Castañeda Camacho por su perseverancia y apoyo en cada una de las etapas de este trabajo. A la facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP por formar parte de mi preparación como profesional y persona. Y a los miembros del jurado por el apoyo para mejorar este trabajo de tesis.

# Contenido

Índice de figuras .....	IV
Índice de tablas .....	VI
Lista de Acrónimos.....	VII
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción a los sistemas móviles.....	3
1.2 Motivación del trabajo de tesis .....	4
1.3 Objetivo.....	5
1.4 Objetivos específicos .....	5
1.5 Alcances y limitaciones .....	6
1.6 Organización de la tesis .....	7
<b>Capítulo 2 Evolución de los sistemas móviles .....</b>	<b>8</b>
2.1 Definiciones principales de los sistemas celulares.....	8
2.1.1 Estación Base .....	10
2.1.2 MTSO .....	10
2.1.3 Antenas .....	10
2.1.4 Antenas sectoriales/direccionales .....	12
2.2 Historia de los sistemas móviles .....	13
2.2.1 Primera Generación 1G .....	13
2.2.2 Segunda Generación 2G.....	14
2.2.3 Generación 2.5G .....	14
2.2.4 Tercera Generación 3G.....	15
2.2.5 Cuarta Generación 4G.....	16
2.2.6 Quinta Generación 5G .....	19
<b>Capítulo 3 Movilidad de la estación base en un sistema celular .....</b>	<b>21</b>
3.1 Estado del arte de la portabilidad de la estación base .....	22
3.1.1 Estaciones base para cada celular.....	22
3.1.2 Redes PMR con estaciones base 4G .....	24

3.2 ABSOLUTE .....	25
3.3 Implementación .....	26
3.3.1 Arquitectura Aero-terrestre del sistema.....	27
3.3.2 Requerimientos de usuario .....	28
3.3.3 Plataformas de baja altitud .....	29
3.3.4 Evaluación del rendimiento.....	30
3.4 Ventajas y retos futuros.....	31
<b>Capítulo 4 Precedentes OFDMA .....</b>	<b>34</b>
4.1 Redes 4G que utilizan el esquema de acceso OFDMA .....	34
4.1.1 LTE.....	35
4.1.2 WiMAX.....	38
4.2 El Estándar IEEE 802.16.....	40
4.2.1 Topologías WiMax.....	45
4.2.2 Capa física (PHY) .....	47
4.2.3 Capa MAC .....	49
4.2.4 La interoperabilidad de WiMax y WiFi .....	50
<b>Capítulo 5 El esquema de acceso OFDMA .....</b>	<b>53</b>
5.1 Descripción del esquema OFDMA.....	53
5.2 Modelado de la eficiencia del sistema OFDMA.....	55
5.2.1 SIR (Signal to Interference Ratio).....	55
5.2.2 Interferencia externa .....	57
5.2.3 Ganancia de la antena .....	58
5.2.4 Métrica de calidad $E_b/I_0$ .....	58
5.2.5 Tasa de transmisión.....	59
5.2.6 Tipos de modulaciones en OFDMA.....	60
5.2.7 Reutilización de frecuencias .....	61
<b>Capítulo 6 Implementación .....</b>	<b>64</b>
6.1 Modelo y desarrollo de la plataforma de evaluación del desempeño de la red OFDMA.....	65
6.2 Resultados .....	71

6.2.1 Evaluación del desempeño de la red con usuarios generados uniformemente y la BS desplazada.....	72
6.2.2 Evaluación del desempeño de la red con incremento de tráfico en las subregiones y la BS desplazada.....	76
6.3 Conclusiones.....	83
<b>Bibliografía .....</b>	<b>85</b>
<b>Apéndice A .....</b>	<b>89</b>
Código en Matlab.....	89
<b>Apéndice B .....</b>	<b>93</b>
Desempeño de otros reusos convencionales de la red OFDMA .....	93
<b>Apéndice C .....</b>	<b>95</b>
Plataforma de evaluación creada en MATLAB®.....	95

# Índice de figuras

Figura 2.1: Representación de una red celular con celdas hexagonales. ....	9
Figura 2.2: Diagrama de radiación de una antena direccional de 60°.....	12
Figura 2.3: Distribución de las diferentes generaciones en distintas áreas poblacionales. ....	18
Figura 3.1: Escalamiento de antenas para redes de telefonía celular.....	23
Figura 3.2: Arquitectura Aero-terrestre ABSOLUTE.....	28
Figura 3.3: Distintas arquitecturas consideradas para la implementación de las AeNBs.....	29
Figura 4.1: Evolución de la norma IEEE 802.11 y 802.16 a lo largo del tiempo...	41
Figura 4.2: Ejemplo de la arquitectura para redes WiMax. ....	45
Figura 4.3: Topología Punto a Punto. ....	46
Figura 4.4: Topología Punto a Multipunto. ....	46
Figura 4.5: Topología Malla. ....	47
Figura 4.6: Torre de protocolo MAC WiMax.....	49
Figura 4.7: Implementación mixta de una red Wifi y WiMax. ....	52
Figura 5.1: Diferencia entre la utilización de subportadoras entre OFDM y OFDMA.....	54
Figura 5.2: Asignación de las celdas para un factor de reutilización $N=19$ . ....	62
Figura 5.3: Reusos utilizados en las redes celulares OFDMA. ....	63
Figura 6.1: Diagrama de flujo de la simulación para sistemas OFDMA convencionales.....	66
Figura 6.2: Diagrama de flujo de la simulación para la red OFDMA con BS móviles y usuarios no uniformes.....	67
Figura 6.3: Creación del modelo de 37 celdas hexagonales. ....	68
Figura 6.4: Tipos de distribuciones aplicadas en la evaluación del sistema OFDMA. ....	68
Figura 6.5: Subregiones creadas para la evaluación de diferentes densidades $P$ de usuarios generados en cada región. ....	69
Figura 6.6: Diferentes densidades dadas para la región (R2). ....	70
Figura 6.7: Desempeño de la red OFDMA convencional y la red con BS móvil para R1 con usuarios distribuidos uniformemente.....	72
Figura 6.8: Desempeño de la red OFDMA móvil para R2 con usuarios uniformemente distribuidos. ....	73

---

Figura 6.9: Desempeño de la red OFDMA móvil para R3 con usuarios uniformemente distribuidos. ....	74
Figura 6.10: Desempeño de la red OFDMA móvil para R4 con usuarios uniformemente distribuidos. ....	74
Figura 6.11: Demostración de la evaluación del desempeño para cada subregión con usuarios sin distribución uniforme. ....	76
Figura 6.12: Desempeño de la red OFDMA convencional y la red con BS móvil para R1 con usuarios sin distribución uniforme. ....	77
Figura 6.13: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R2.....	78
Figura 6.14: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R2 y usuarios sin distribución uniforme. ....	78
Figura 6.15: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R3.....	79
Figura 6.16: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R3 y usuarios sin distribución uniforme. ....	80
Figura 6.17: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R4.....	81
Figura 6.18: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R4 y usuarios sin distribución uniforme. ....	81

---

# Índice de tablas

Tabla 3.1: Mediciones del desempeño la PLMU. ....	30
Tabla 4.1: Características básicas de las revisiones en la norma IEEE 802.16. ....	42
Tabla 4.2: Perfiles de sistema de WiMax Forum.....	43
Tabla 4.3: Perfiles de certificación de WiMax Forum. ....	44
Tabla 4.4: Interfaces físicas (PHY) del estándar IEEE 802.16.....	48
Tabla 6.1: Parámetros de la red OFDMA implementada. ....	71
Tabla 6.2: Ganancias del sistema móvil en comparación al desempeño de la red convencional con reuso 1x3x1.....	75
Tabla 6.3: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes P en R2 para los dos tipos de evaluación de la red.....	79
Tabla 6.4: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes P en R3 para los dos tipos de evaluación de la red.....	80
Tabla 6.5: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes P en R4 para los dos tipos de evaluación de la red. ....	82

---

## Lista de Acrónimos

<b>(N)LOS</b>	(Non) Line of Sight
<b>(W)CDMA</b>	(Wideband) Code Division Multiple Access
<b>(W)MAN</b>	(Wireless) Metropolitan Area Network
<b>3GPP</b>	Third Generation Partnership Project
<b>ABSOLUTE</b>	Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Unexpected & Temporary Events
<b>AMTS</b>	Advanced Mobile Telephone System
<b>BPSK</b>	Bi-Phase Shift Keying
<b>BS</b>	Base Station
<b>BWA</b>	Broadband Wireless Access
<b>DL</b>	Downlink
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>E-UTRA</b>	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
<b>EV-DO</b>	Evolution-Data Optimized
<b>FDD</b>	Frequency División Duplexing
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications
<b>HAP</b>	High Altitude Platform
<b>HSCSD</b>	High-Speed Circuit-Switched Data
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Packet Access

---

<b>HSPA</b>	High-Speed Packet Access
<b>HSUPA</b>	High-Speed Uplink Packet Access
<b>IMTS</b>	Improved Mobile Telephone System
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>LAP</b>	Low Altitude Platform
<b>LTE(A)</b>	Long Term Evolution (Advanced)
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>MTS</b>	Mobile Telephone System
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PMR</b>	Private Mobile Radio
<b>PPDR</b>	Public Protection and Disaster Relief
<b>PTT</b>	Push To Talk
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>SAP</b>	Service Access Point
<b>SDR</b>	Software-defined radio
<b>SIMO</b>	Single Input Multiple Output
<b>SS</b>	Subscriber Stations
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TETRA</b>	Terrestrial Trunked Radio
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle

<b>UICC</b>	Universal Integrated Circuit Card
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# Capítulo 1

## Introducción

En las últimas dos décadas el número de suscriptores a los sistemas celulares creció por encima de los 700 millones de usuarios superándose en 2017 los 7.8 billones [1][2]. En algunos países por ejemplo más de 15 millones de suscriptores incrementan mensualmente la red celular [3]. Por lo tanto, encontrar el diseño óptimo de una red móvil se ha vuelto relevante. Así, por ejemplo, determinar la localización óptima de una estación base, obtener una tasa de datos deseable y estimar la cobertura de la red, son algunos de los aspectos cruciales en el diseño de una red celular [4].

La cobertura de la estación base celular no es uniforme y se ve afectada por oscurecimientos generados por estructuras grandes, el efecto de trayectorias múltiples y la absorción por varias superficies. Los usuarios con requerimientos relativamente grandes de datos sufren en tales ubicaciones debido a las pérdidas y distorsión que generan tales fenómenos (*impairments*), y en consecuencia un aumento de la degradación del ancho de banda. Problemas similares en el ancho de banda efectivo se pueden presentar en regiones dentro del área de cobertura de la estación base en las que existen demandas de datos intermitentes (*flash crowds*) [5].

Los métodos de acceso múltiple permiten que múltiples usuarios compartan un canal de comunicación para transmitir información a un receptor. Existen diferentes formas de compartir recursos de radio entre múltiples usuarios, asignando

---

regiones en frecuencia (FDMA) y espacio en diferentes tiempos (TDMA). Recientemente, la técnica OFDMA (*Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales*) se ha introducido basando su esquema en la técnica de multiplexaje OFDM (*Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales*). Esta proporciona ventajas significativas en términos de eficiencia espectral, robustez frente al desvanecimiento de canales multitrayecto, resistencia a interferencia multiusuario, ecualización simplificada, entre otras. Esta técnica es la versión multiusuario del ampliamente reconocido esquema de modulación OFDM. Este esquema presenta ventajas sobre otros sistemas, de las cuales podemos mencionar su habilidad para funcionar correctamente en canales de comunicación que presentan condiciones difíciles, tales como atenuación en las frecuencias altas, especialmente en cables de cobre de gran longitud, o la interferencia de banda angosta y el desvanecimiento selectivo de la señal con la frecuencia, que se presentan en las comunicaciones inalámbricas [6].

## 1.1 Introducción a los sistemas móviles

Las telecomunicaciones, especialmente la telefonía móvil, es en la actualidad uno de los sectores con mayor dinamismo y crecimiento a nivel mundial. Esto trae consigo un aumento constante de los requerimientos de la calidad en su infraestructura, dados en gran parte por la cantidad de usuarios y los nuevos servicios a implementar en dichas redes.

Muchos estudios prevén un continuo crecimiento del número de suscriptores. Para el tercer cuarto del año 2017, el número de suscriptores a la telefonía móvil presentó un incremento del 6% por año, alcanzando los 7.8 billones de usuarios para ese mismo año. Para este periodo, el número de suscripciones a la red de banda ancha móvil aumentó 20% por año, incrementando a 210 millones, la tecnología LTE (*Evolución a Largo Plazo*) tuvo 170 millones de nuevos suscriptores, alcanzando un total de 2.5 billones, mientras que para tecnologías como WCDMA/HSPA sumo 60 millones, los suscritos a la tecnología GSM/EDGE únicamente, disminuyeron 130 millones, hubo un total de 95 millones de usuarios en este periodo. Para el año 2021, se espera que en número de suscriptores a la tecnología 5G sea de 1 billón.

Otro punto a considerar es el tráfico de datos en las redes móviles, el cual continúa creciendo. Mensualmente, el tamaño del tráfico de datos es de 14 EBs, del cual el 48% de tráfico es video, 34% redes sociales, 32% audio, 31% descarga de software, 21% navegación y 20% compartición de archivos. Para 2023, el tráfico mensual de datos será de 110 EBs, de los cuales aproximadamente el 75% será video [2]. Es evidente el drástico crecimiento en el uso de los servicios de telefonía móvil y su penetración en prácticamente todos los países en el mundo.

## 1.2 Motivación del trabajo de tesis

Cada vez más usuarios usan servicios 3G o 4G en sus teléfonos móviles mientras están al aire libre. Sin embargo, la intensidad de la señal móvil varía significativamente en las diferentes ubicaciones, lo que provoca variaciones en el ancho de banda de datos disponibles. Estas regiones de baja disponibilidad son causadas principalmente por zonas de oscurecimiento. En menor medida, también podrían ser causadas por trayectos múltiples o alta absorción debido a las condiciones climáticas. En un sistema móvil el servicio depende de la cobertura y la ubicación de las estaciones base.

Aunque la densidad de las estaciones base se puede aumentar; prácticamente, su ubicación está dictada por la viabilidad física, seguida por la ganancia de la antena y los ajustes de direccionalidad para proporcionar una cobertura aceptable. Dentro de un análisis razonable, puede que nunca sea posible evitar los oscurecimientos (Shadowing) [5].

Así también, un factor importante a considerar en el diseño de estas redes son los desastres naturales, donde se lucha para mantener las comunicaciones básicas durante un evento de este tipo, en parte debido a la naturaleza inconexa del sistema de telecomunicaciones. Por ejemplo, un terremoto de magnitud 9,0 golpeó la costa este de Japón en 2011, seguido de cerca por un tsunami masivo. El Grupo NTT, una de las compañías de telecomunicaciones más grandes de Japón, sufrió daños en 6.700 piezas de equipos de estaciones base, y las inundaciones arruinaron 65.000 de los postes de teléfono en su red. Los teléfonos móviles, las computadoras portátiles e incluso las líneas fijas funcionaron mal durante los días críticos posteriores al terremoto. Cada vez que una empresa de telecomunicaciones se enfrenta a un daño extenso en la red, los técnicos comienzan a transportar estaciones base temporales a los sitios dañados de la torre. También despachan unidades móviles, que son grandes camiones con estaciones base conectadas a los mástiles de antena que sobresalen de la parte posterior. Sin embargo, estos camiones son muy costosos en términos de mantenimiento y almacenamiento, y las unidades móviles solo pueden llegar a las áreas que permanecen accesibles por carretera. Una vez que las unidades móviles están en su lugar, sus antenas no pueden alcanzar la altura que una torre típica tiene, lo que significa que las unidades son más

susceptibles a la interferencia [7]. Debido a esto, se propone el análisis del desempeño de una red celular cuando una o más de sus estaciones bases son móviles, debido a problemas con regiones oscuras en la red, daño de las estaciones base fijas por desastres naturales o el incremento de la densidad de usuarios en una región por eventos de carácter social que atraen un importante número de personas a una región.

### 1.3 Objetivo

Diseñar una plataforma de simulación *Monte Carlo* que permita la evaluación del enlace de bajada (DL) de un sistema celular OFDMA con estaciones base móviles y distintas distribuciones de densidad de usuarios en el área de cobertura.

### 1.4 Objetivos específicos

1. Analizar los principios de funcionamiento del esquema de acceso OFDMA y la norma que lo regula.
2. Analizar la forma de operación y funcionamiento de las redes celulares de cuarta generación.
3. Analizar las estrategias de medición del desempeño en redes celulares convencionales OFDMA.
4. Diseñar en MATLAB® una plataforma de simulación que permita evaluar el desempeño en una red celular OFDMA convencional.
5. Proponer y desarrollar una estrategia de evaluación del desempeño en la red celular OFDMA con estaciones base móviles y diferentes distribuciones de densidad.
6. Comparar los resultados del desempeño obtenido en la plataforma propuesta con el de una red OFDMA convencional y estimar la conducta del desempeño en la red.

## 1.5 Alcances y limitaciones

El presente trabajo de tesis estará basado en la utilización de herramientas matemáticas como la probabilidad, procesos estocásticos, la teoría fundamental de funcionamiento de las redes móviles celulares y el empleo de una plataforma de software como MATLAB® para el modelado y simulación de las mismas. En este proyecto se propone diseñar una plataforma de evaluación del desempeño de una red OFDMA con estaciones base móviles partiendo de lo reportado en la literatura para este tipo de sistemas en su forma convencional.

Se iniciará con la investigación del funcionamiento de las redes celulares 4G, la búsqueda de los parámetros matemáticos que modelan este tipo de redes para la implementación de la plataforma de simulación. El primer paso será diseñar la simulación de una red celular conformada por 37 celdas hexagonales, las celdas se dividirán en tres sectores, en cada uno de los sectores se ubicará una BS. Se analizará el desempeño del enlace de bajada por ser el que requiere mayor capacidad en términos de ancho de banda y, en consecuencia, el peor escenario de evaluación. Por lo tanto; en uno de los sectores de la celda central, para una simulación de eventos discretos *Monte Carlo*, se generarán aleatoriamente un número de usuarios uniformemente y no uniformemente distribuidos, en torno a los cuales se obtendrá la relación señal a interferencia (SIR), para finalmente deducir la tasa de transmisión de datos en el enlace de bajada en el sistema celular.

## 1.6 Organización de la tesis

El trabajo de tesis se organiza de la siguiente manera, en el Capítulo 2 se exponen los elementos y sus características que conforman una red celular, la evolución de los sistemas móviles desde la primera generación, hasta el panorama a futuro para las redes de quinta generación. En el Capítulo 3 expone los antecedentes y aspectos más destacados para la consideración de la movilidad de las estaciones base en una red celular, las diferentes alternativas desarrolladas, sus principales características, y se discute sus ventajas con respecto a las redes con estaciones base fijas y algunos de sus retos a futuro. El Capítulo 4 especifica los diferentes estándares que dieron paso a la creación de las redes móviles de cuarta generación con el esquema OFDMA, así como el Estándar IEEE 802.16 y su interoperabilidad con las redes WiFi.

En el Capítulo 5 se describe el esquema de acceso OFDMA, se detallan los efectos del canal, los cuales son base para la evaluación del desempeño de estas redes. Por último, en el Capítulo 6 se realiza el modelado matemático, el desarrollo, e implementación de la plataforma de desempeño de la red celular para la evaluación de los objetivos antes descritos.

## Capítulo 2

# Evolución de los sistemas móviles

### 2.1 Definiciones principales de los sistemas celulares

En los sistemas celulares, el área de cobertura de servicio es dividido en subregiones de cobertura llamadas celdas. Cada celda es atendida por una antena o estación base, integrada por un transmisor, un receptor y una unidad de control, a cada una se le asigna una banda de frecuencias. Con el fin de evitar interferencia co-canal, a las celdas adyacentes se les asignan diferentes frecuencias; sin embargo, si las celdas están lo suficientemente separadas, estas pueden ocupar las mismas bandas de frecuencia.

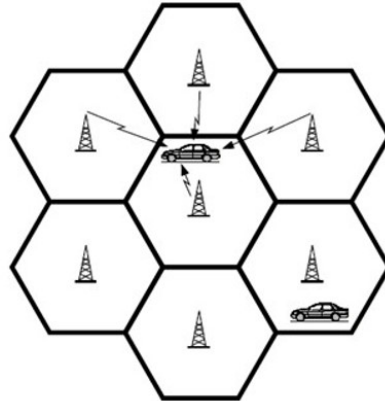


Figura 2.1: Representación de una red celular con celdas hexagonales.

Para diseñar un sistema celular se deben considerar los siguientes aspectos [8][9]:

- **Configuración del área de cobertura:** Debido a que el patrón de celdas hexagonales proporciona la transmisión más efectiva aproximada al comportamiento ideal de la red, eliminando espacios de traslape presentes en un patrón circular, se elige como una representación ideal como se observa en la Figura 2.1. Una celda se define por su tamaño físico, el tamaño de su población y sus patrones de tráfico. El número de celdas es definido por el proveedor de servicios, de acuerdo a patrones de tráfico anticipado. Cada área del servicio móvil se distribuye en canales de radio celular. Cada transmisor y receptor con un área de cobertura tiene un subconjunto fijo de canales de radio disponibles de acuerdo al flujo de tráfico.
- **Tipo de enlace:** Existen dos tipos de enlace, el que va de estación base a usuario móvil, denominado enlace descendente (DL), y el que va de usuario móvil a estación base, denominado como enlace ascendente (UL).
- **Reuso de frecuencia:** El reuso de frecuencia tiene por objetivo la distribución de la banda de frecuencia de un sistema celular de tal forma que dos celdas no se interfieran una a la otra. Es decir, un canal de radio  $F_1$  empleado en una celda  $C_1$  de radio  $R$ , puede ser utilizado en otra celda  $C_2$  de radio  $R$  pero ubicada a una distancia  $D$  de la original. El reuso es un concepto central dentro de los sistemas celulares móviles.

Los sistemas móviles celulares fueron diseñados para ofrecer servicios de transmisión de voz y datos sin la necesidad de una conexión física, lo que implica libertad de movimiento dentro de una región de cobertura. Un sistema celular, comúnmente está conformado por los siguientes elementos [8][9].

### **2.1.1 Estación Base**

La estación base (BS) incluye la antena, un controlador, y un número de transreceptores. 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 activos dentro de una celda a través de la región de cobertura de la BS. Esta estación base sirve como un control central para todos los usuarios dentro de la celda, las unidades móviles se comunican directamente con la estación base, la cual sirve como retransmisora de la señal emitiendo a una potencia de mayor intensidad. La estación base puede mejorar la calidad de las transmisiones.

### **2.1.2 MTSO**

Cada estación base se conecta con la Oficina de Conmutación de Telefonía Móvil. El MTSO realiza el proceso de conexión de llamadas entre las unidades móviles. También se encarga de conectar a los usuarios celulares con la red telefónica. Asigna los canales de voz a cada llamada, controla el procedimiento de transferencia de llamada y monitorea la llamada para fines de facturación.

### **2.1.3 Antenas**

Una antena se define como la parte de un sistema emisor o receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Su objetivo es transmitir o recibir señales, en cada aplicación existen condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, niveles de potencia soportados, frecuencia de trabajo, etc.

Como una antena forma parte de un sistema más grande, es importante caracterizarla con una serie de parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena, o bien, especificar el comportamiento deseado de la antena para incluirla en dicho sistema.

Los parámetros más importantes de las antenas se describen a continuación [10] [11] [12].

- **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 puede ser calculada a partir del diagrama de radiación. 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 la relación “*forward/backward*”, y es uno de los parámetros más importantes relacionado a interferencias.
- **Diagrama de radiación:** La Figura 2.2 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 utilizado en coordenadas esféricas. Con la antena situada en el origen y a una distancia constante, el campo eléctrico se expresa en función de variables angulares. En un diagrama típico, es posible observar una zona en la que la radiación es máxima, denominado lóbulo principal, las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se denominan lóbulos laterales, y al lóbulo lateral de mayor amplitud se le 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:** 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, la potencia de pérdida.
- **Ancho del 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 potencia.
- **Intensidad de radiación:** Es la potencia radiada por unidad de ángulo solido en una determinada dirección, a grandes distancias, tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena.

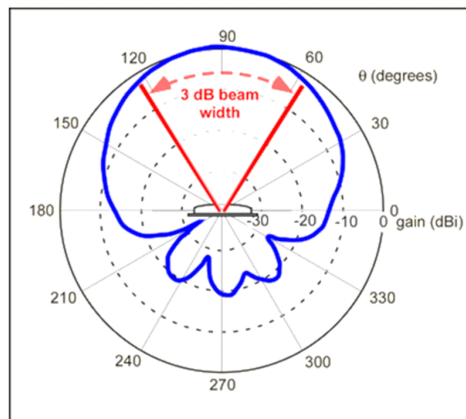


Figura 2.2: Diagrama de radiación de una antena direccional de 60°.

#### 2.1.4 Antenas sectoriales/direccionales

Las antenas sectoriales emiten un haz más amplio que una antena direccional. Para tener una cobertura de 360° y un largo alcance, se pueden tener tres antenas sectoriales de 120°. Las antenas direccionales se emplean para reducir el nivel de interferencia en el sistema. Una antena direccional 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, evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas. Proporcionan un mejor rendimiento pues concentran gran parte de la radiación en una dirección deseada.

## 2.2 Historia de los sistemas móviles

### 2.2.1 Primera Generación 1G

La primera generación de los sistemas móviles fue diseñada en 1970 e introducida en la década de 1980, basando su funcionalidad en los sistemas análogos. Los sistemas análogos se basan en la tecnología de conmutación de circuitos y solo ofrecen comunicación de voz y no comunicación de datos. Ofrece tecnologías, tales como, sistema de telefonía móvil (MTS), sistema de telefonía móvil avanzada (AMTS), servicio telefónico móvil mejorado (IMTS) y pulsar para hablar (PTT).

La calidad de los enlaces de voz es muy pobre, tiene una baja velocidad de transmisión (2400 baudios), la transferencia entre celdas es muy imprecisa, tienen baja capacidad de usuarios y la seguridad prácticamente no existe. La tecnología predominante de esta generación es AMTS.

En 1979 comenzó a operar en Tokio, Japón, el primer sistema comercial de telefonía celular por la compañía NTT. En 1981 en los países Nórdicos se introduce un sistema celular similar a AMTS; Mientras ese mismo año, en los Estados Unidos, Motorola y American Radio Phone comenzaron las pruebas de un segundo sistema norteamericano de telefonía celular, en el área de Washington/Baltimore. En 1982, la FCC (*Comisión Federal de Comunicaciones*), autorizó por fin el servicio comercial de telefonía celular en los Estados Unidos.

A partir de entonces en varios países se diseminó la telefonía celular como una alternativa a la telefonía convencional alámbrica. La tecnología inalámbrica tuvo gran aceptación, por lo que a los pocos años de implantarse se empezó a saturar el servicio surgiendo la imperiosa necesidad de desarrollar e implementar otras formas de acceso múltiple al canal y transformar los sistemas analógicos a digitales para darle cabida a más usuarios [9] [15].

## 2.2.2 Segunda Generación 2G

Desde la década de 1980, se introdujeron los sistemas móviles de segunda generación (2G) para luego terminar a finales de la década de 1990, principalmente para la transmisión de voz por señal digitalizada a velocidades de hasta 64 Kbps. Generalmente está relacionado con el sistema global para servicios móviles (GSM), tenía un ancho de banda de 30-200 KHz. El sistema de comunicación móvil 2G es un sistema celular digital. Este sistema todavía es popular en diferentes áreas del mundo. Esta generación fue particularmente utilizada para la transmisión de voz y datos y también ofreció algunos servicios adicionales, como servicios de mensajes cortos (SMS), servicios de mensajes de imagen y servicios de mensajes multimedia (MMS), GPRS y correo electrónico.

En esta generación, se utilizaron dos esquemas de modulación de acceso múltiple; uno es el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y el segundo es el acceso múltiple por división de código (CDMA). Los protocolos empleados en los sistemas 2G soportaban velocidades de información más altas para voz, pero limitados en comunicaciones de datos. La velocidad de transmisión de la segunda generación se limitó a 9.6 kbps, velocidad considerablemente menor que los 56 Kbps que permite la telefonía de cable y de la de 1 Mb del cable modem. Las dos soluciones a estos problemas de ancho de banda las proporcionaron las redes móviles 2.5G y 3G [13] [15].

## 2.2.3 Generación 2.5G

La generación 2.5G brinda características extendidas para ofrecer capacidades adicionales a la de los sistemas 2G, tales como GPRS, HSCSD, EDGE, IS-136B, IS-95B, entre otros. Los proveedores de servicios de telefonía europeos y de Estados Unidos se movieron a 2.5G en el 2001. Mientras que Japón fue directo de 2G a 3G también en el 2001. Al lado de 2G, el sistema 2.5G usa conmutación de paquetes y dominio de conmutación de circuitos y proporciona velocidad de datos de hasta 144 Kbps [13] [15].

## 2.2.4 Tercera Generación 3G

La tercera generación de los sistemas móviles se presentó en el año 2000. Son los servicios que combinan el acceso móvil de alta velocidad con los servicios basados en el Protocolo de Internet (IP). La 3G es tipificada por la convergencia de la voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportaron altas velocidades de información enfocado para aplicaciones como el audio (MP3), video en movimiento, video conferencia y acceso rápido a Internet, sólo por nombrar algunos. Los sistemas 3G alcanzan velocidades de hasta 384 Kbps, permitiendo una movilidad total a usuarios viajando a 120 kilómetros por hora en ambientes exteriores, mientras que alcanza una velocidad máxima de 2 Mbps permitiendo una movilidad limitada a usuarios caminando a menos de 10 kilómetros por hora en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores.

3G se basa en los Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Universales (UMTS). UMTS es un elemento bajo un conjunto de estándares IMT-2000 emitido por ITU. La familia IMT-2000 consta de cinco sistemas:

1. Acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA) incluyendo modos TDD y FDD.
2. CDMA 2000 1X.
3. Acceso múltiple por división de código síncrono de división de tiempo (TDSCDMA).
4. EDGE (adicionalmente llamado UWC-136).
5. Telecomunicaciones digitales inalámbricas mejoradas (DECT).

Para el final de la fase de selección para IMT- 2000, dos grandes familias de sistemas han llevado a la creación de dos grupos de estandarización (que incluyen operadores y fabricantes):

- 3GPP, que desarrolló el estándar W-CDMA también conocido como Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) en modos FDD y TDD.

- 3GPP2, que construyó los estándares CDMA 2000 como una evolución de los estándares IS-95.

La ITU estableció pautas para sistemas 3G en el marco IMT-2000, para soportar velocidades de datos de 144 Kbps para alta movilidad y 2 Mbps en una ubicación fija [13] [15].

## 2.2.5 Cuarta Generación 4G

La cuarta generación se enfoca, no en una tecnología o estándar definido, sino en una colección o integración de tecnologías y protocolos que se espera que proporcionen redes completas y seguras de paquetes conmutados basados en IP, optimizados para datos.

La *Unión Internacional de Telecomunicaciones* (ITU) definió el Estándar Internacional de Telecomunicaciones Móviles Avanzadas (IMT-Advanced) como el estándar global para las comunicaciones inalámbricas 4G.

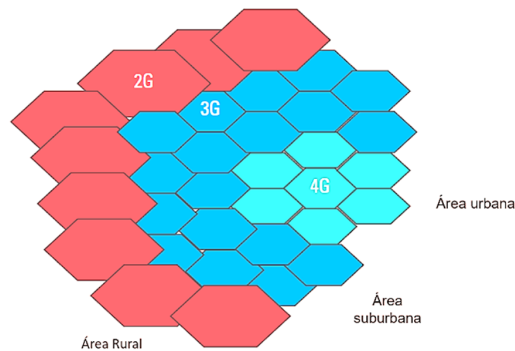
Como se indica en la Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), 4G proporciona conexiones de muy alta velocidad, 100 Mbps para entornos exteriores y 1 Gbps para entornos interiores. Una red heterogénea 4G tiene alta capacidad, bajo costo, baja latencia y buena cobertura. Hay muchos competidores, como LTE Advanced y Wireless MAN Advanced que intentan cubrir estos requisitos, especialmente el de las altas velocidades, mientras que otros candidatos están tratando de construir una red heterogénea 4G como una convergencia entre red inalámbrica y cableada.

En 2001, los grupos de estandarización consideraron dar a los dispositivos acceso a múltiples redes inalámbricas usando una red superpuesta o integrando inteligencia en las redes. Estos investigadores han propuesto puntos de acceso comunes para permitir que un dispositivo inalámbrico acceda a varias redes inalámbricas diferentes y han previsto *roaming* a través de redes inalámbricas heterogéneas, ofreciendo altas tasas de bits para servicios multimedia y suministro de comunicaciones inalámbricas por conmutación de paquetes.

El objetivo de las redes inalámbricas 4G es permitir a los usuarios pasar de un tipo de red inalámbrica a otro. Por ejemplo, cuando se está en casa, un usuario puede usar el dispositivo móvil como un teléfono inalámbrico para acceder a la red telefónica pública conmutada, pero cuando está en el automóvil, puede conectarse a una red móvil. Cuando se encuentre en un área no cubierta por un servicio celular, el usuario puede cambiar a una red basada en satélite. Después de llegar a la oficina, él o ella podría cambiar a una LAN inalámbrica de banda ancha. Los factores que distinguen a la red 4G de las redes de generaciones anteriores serían, la capacidad de recorrer redes celulares, LAN inalámbricas y WAN, satélites y otras redes; Interoperabilidad de IP; y velocidades de bits más altas (50 Mbps o más).

Actualmente, varias operadoras ofrecen un servicio de red 4G, pero estas redes 4G utilizan tecnologías 3G mejoradas o solo ofrecen una implementación mínima de las tecnologías 4G. Las redes 3G que se han extendido a 4G son las basadas en el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (W-CDMA) y WiMAX. W-CDMA se convirtió en HSPA+, el cual AT&T usa actualmente.

AT&T también está invirtiendo mucho en LTE y LTE Advanced. WiMAX se ha convertido en una red 4G y Clearwire lo utiliza y lo vende a Sprint. La red 4G que se ejecuta a baja velocidad es LTE, utilizada por Verizon. Sin embargo, estas redes no son verdaderas 4G porque no ofrecen una velocidad 4G (velocidad de bits) compatible con la Telefonía Móvil Internacional (IMT) de 50 a 100 Mbps por usuario. Actualmente se está trabajando para lograr sistemas 4G compatibles con IMT, que podrían ofrecerse en los próximos años. Este servicio 4G de nivel inferior está disponible en su mayoría en centros de población y áreas urbanas, y muchas áreas cercanas aún tienen servicio 3G o incluso 2G. En la Figura 2.3 se observa este patrón de distribución descrito [13] [14] [15].



*Figura 2.3: Distribución de las diferentes generaciones en distintas áreas poblacionales.*

Algunas de las tecnologías clave requeridas para 4G se describen brevemente a continuación [13]:

## 1. OFDMA

El Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) se utiliza para mejorar el rendimiento de la capa física. Con la ayuda de OFDMA, es posible conocer el dominio del tiempo, el dominio del espacio, el dominio de la frecuencia e incluso el dominio del código para optimizar el uso del canal de radio.

## 2. Radio definida por software

Radio Definido por Software (SDR) utilizado para procesamiento de alta capacidad para desarrollar estaciones base y terminales multibanda y multiestándar. Ejemplo de esto es, el aumento de la capacidad de la red para un tiempo específico. Un operador se volverá a configurar con varios módems en una Base Transceptora (BTS) dada. SDR hace que sea fácil configurar la red de nuevo. En un sistema 4G, SDR se convertirá en un habilitador para la agregación de pico células o micro células multiestándar.

### 3. Múltiples Entradas Múltiples Salidas

Los sistemas de entradas múltiples y salidas múltiples conocidas como MIMO. Utiliza la multiplexación de señal entre múltiples antenas transmisoras (multiplexación espacial) y en tiempo o frecuencia. Es muy adecuado para OFDMA, ya que es posible trabajar independientemente con el tiempo en tanto la forma de onda OFDMA esté correctamente diseñada para el canal.

### 4. HSPA +

HSPA + es conocido como Acceso de Paquete de Alta Velocidad. HSPA + está especialmente diseñado para redes 3G LTE. El acceso a paquetes de alta velocidad está hecho para el usuario final. HSPA + proporciona una evolución del acceso a paquetes de muy alta velocidad. Proporciona velocidades de datos de hasta 168 Mbps para el dispositivo móvil (Enlace de bajada) y 22 Mbps desde el dispositivo móvil (Enlace de subida).

### 5. EDGE

EDGE es un sistema que mejora la velocidad de datos para GSM Evolution o GPRS. EDGE es usado para telefonía móvil digital, que permite mejorar la velocidad de transmisión de datos y es compatible con versiones anteriores de GSM. EDGE se usa desde las generaciones pre 3G como un sistema GSM. EDGE se implementó en redes GSM a partir de 2003, inicialmente por Cingular (ahora AT&T) en los Estados Unidos. EDGE está estandarizado también por 3GPP como parte de la familia GSM. Se pueden esperar tasas de bits máximas de hasta 1 Mbs y tasas de bits típicas de 400 Kbps.

## 2.2.6 Quinta Generación 5G

Se espera que la quinta generación se lance en 2020 aproximadamente. Esta tecnología ofrecerá un incremento significativo en el ancho de banda nunca antes experimentado por el usuario. 5G se basa principalmente en tecnologías de la cuarta generación.

---

La quinta generación estará soportada en la utilización de LASCDDMA (*Acceso Múltiple por División de Código Sincronizado de Área Amplia*), OFDMA, MCCDDMA (*Acceso Múltiple por División de Código de Múltiples Operadores*), UWB (*Ultra-Banda Ancha*), Network-LMDS (*Servicio de Distribución Multipunto Local*) e IPv6. 5G ofrecerá capacidades de datos elevadas y llamadas ilimitadas e innumerables transmisiones de datos juntas dentro del último sistema operativo celular.

La quinta generación marcaría una diferencia importante y agregaría más servicios y ventajas al mundo a través de 4G. 5G sería una tecnología más sensible que interconecta todo el mundo sin límites [15].

# Capítulo 3

## Movilidad de la estación base en un sistema celular

Como un efecto inherente en las redes celulares, los efectos del canal, tales como el oscurecimiento pueden no ser resueltos, estos puntos débiles pueden cubrirse con soluciones de celdas celulares sobre ruedas, pero no es una solución económica para patrones de demanda esporádica. El uso de drones se considera una solución viable para contrarrestar dichos inconvenientes, así como para proporcionar cobertura a regiones rurales donde no existe red celular alguna. Se puede montar una extensión de torre celular a pequeña escala, o un punto de acceso Wifi en drones para servir en áreas con déficit de ancho de banda [16].

A su vez, las infraestructuras de comunicación terrestre pueden ser total o parcialmente dañadas durante escenarios de desastre naturales o eventos temporales. En tales escenarios, la necesidad de restablecer el sistema de comunicación o el desplegar infraestructuras temporales, es un requisito crucial de los oficiales de seguridad pública y socorro en casos de desastre para proporcionar servicios esenciales de comunicación, ayuda y rescate a las comunidades en las áreas afectadas [17].

En consideración de los efectos del canal de la red, es posible visualizar a los drones como solución a problemas de cobertura, así como al rápido despliegue de

una red celular de respaldo en casos de desastres. Se da lugar entonces al estudio de alternativas a problemas de tales dificultades. El proyecto ABSOLUTE se enmarca como la solución más notable a los problemas antes mencionados.

## **3.1 Estado del arte de la portabilidad de la estación base**

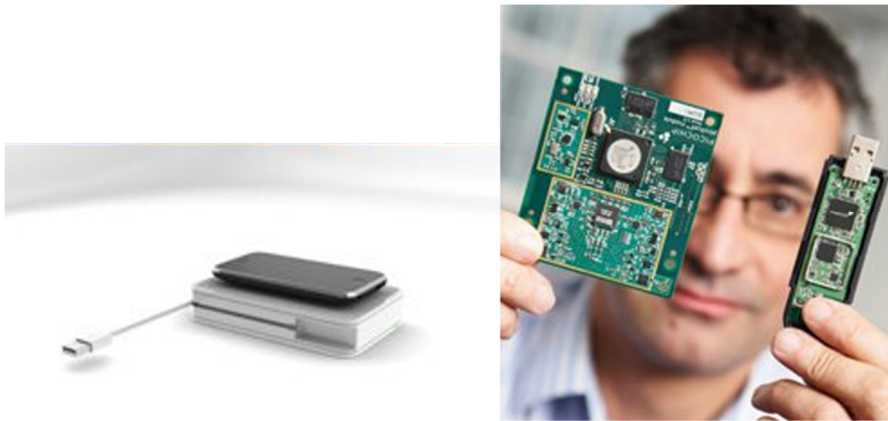
### **3.1.1 Estaciones base para cada celular**

El ex ingeniero de Apple Steve Perlman creó una tecnología llamada pCell, la cual soluciona la saturación de las redes celulares debido al tráfico de datos, en esta tecnología, da a cada dispositivo móvil la posibilidad de tener su propia conexión en lugar de compartir una sola estación base. En su laboratorio en San Francisco, mostró dispositivos móviles que transmitían archivos masivos (video en 4K) a través de su propio equipo de red inalámbrica. El objetivo de la demostración era verificar no solo que pCell funciona al menos en una configuración limitada, sino también que es compatible con el hardware existente.

Su tecnología localiza teléfonos inteligentes y tabletas individuales y utiliza operaciones matemáticas complejas para crear una señal única para cada dispositivo. En lugar de compartir ancho de banda, cada persona se acerca a la capacidad total del transmisor. Pero para funcionar correctamente, pCell requiere que enormes centros de datos que manejen todas esas operaciones matemáticas en tiempo real, recalculando constantemente para mantener los dispositivos conectados, lo que supone encontrar socios comerciales dispuestos a invertir millones de dólares en centros de datos y los miles de antenas que el sistema requeriría [18].

Dos firmas del Reino Unido, PicoChip y Ubiquisys, han desarrollado dispositivos USB de bolsillo que se muestran en la Figura 3.1, que se conectan a teléfonos celulares cercanos utilizando las mismas frecuencias de una estación base convencional.

Los dispositivos utilizan la conexión a internet de una computadora u otro dispositivo para vincularse a la red celular y retransmitir llamadas o datos. El diseño de PicoChip tiene el tamaño de un dispositivo USB, mientras que el diseño de Ubiquisys es del tamaño de un teléfono celular pequeño, en la Figura 3.1 se observa el dispositivo comercializado por Ubiquisys (izquierda) que permite a usuarios europeos realizar llamadas en estados unidos sin cobro de roaming, mientras que la femtocelda escalada de PicoChip (derecha) puede ser tan pequeña como para encajar en la carcasa una memoria USB.



*Figura 3.1: Escalamiento de antenas para redes de telefonía celular.*

Los dispositivos son una forma reducida de femtocelda, una torre celular reducida que algunos operadores móviles han impulsado en los últimos dos años como una solución para los usuarios con poca recepción en el hogar. Cada vez más, se los ve como una forma de aumentar las velocidades de datos también. Sin embargo, las femtoceldas han sido significativamente más grandes, generalmente de tamaño similar a un módem de banda ancha de línea fija que también requieren su propia conexión de energía.

Ubiquisys fabricó el dispositivo para permitir a los usuarios eludir el alto costo del roaming en redes internacionales. Funciona de manera similar al dispositivo de PicoChip, pero viene con una funcionalidad adicional para lidiar con la complejidad de las diferentes leyes de espectro inalámbrico en diferentes países.

Un usuario podría evitar los altos cargos de roaming, mientras que el proveedor de servicios inalámbricos estaría alentando el uso del teléfono que de otro modo no sucedería.

Sin embargo, existen desafíos regulatorios considerables, los operadores necesitarían poder garantizar que dicho dispositivo funcionara legalmente, y las regulaciones inalámbricas son muy complejas, diferentes para cada país. Japón ofrece un ejemplo particularmente desafiante, allí la ley exige que un ingeniero acompañe la instalación de todos los dispositivos similares a torres celulares, sin importar cuán pequeños sean [19].

### 3.1.2 Redes PMR con estaciones base 4G

La Radio Móvil Privada (PMR), también conocida como Radio Móvil Profesional, es un sistema móvil que sirve a un grupo cerrado de usuarios, normalmente es propiedad y está operado por la misma organización. PMR fue desarrollado para usuarios comerciales que necesitan mantenerse en contacto a distancias relativamente cortas con una estación base central, también llamada despachador. Un ejemplo típico es una compañía de taxis. PMR también es ampliamente utilizado por los servicios de emergencia. Las redes PMR consisten en una o más estaciones base y una cantidad de terminales móviles [20].

PMR es un nicho de mercado que recientemente ha recibido una atención renovada bajo la premisa de las comunicaciones en casos de emergencia. Las comunicaciones en caso de emergencia son de naturaleza repentina y pueden requerir una capacidad de uso extremadamente alta por períodos cortos de tiempo (días o semanas). Hasta ahora, las organizaciones de seguridad pública han confiado en la tecnología PMR como es TETRA.

TETRA es un estándar de radio digital abierto. Un grupo de usuarios son los Servicios de emergencia (como los departamentos de policía y bomberos). El estándar de radio TETRA está definido por ETSI. Esta implementada ampliamente en Europa y es adecuada para las comunicaciones de voz, incluidas llamadas grupales y el envío de mensajes. Dado que las organizaciones de protección pública

intervienen en varias situaciones complejas, también deberían aprovechar los servicios de datos como el video de alta definición y las redes sociales. Sin embargo, TETRA no puede ofrecer servicios de alta velocidad de datos y, por otro lado, los costos de actualización de la red PMR no son sostenibles.

Para superar las limitaciones de TETRA, se propuso elevar unidades aéreas con una cabeza de radio remota (RRH) 4G, también conocidas como AeNB. Estas unidades se posan a una altitud que va desde unos pocos cientos de metros hasta un kilómetro, dependiendo del tipo de unidad, estas pueden estar atadas al suelo, en donde se encuentra la unidad de procesamiento de banda base. Aunque este sistema podría proporcionar la solución para habilitar las comunicaciones de datos en redes PMR en un área de varios kilómetros de radio, en muchos casos la cobertura podría ser escasa (por ejemplo, en interiores) o no existente al borde de la red celular aérea [21].

## 3.2 ABSOLUTE

Las redes aéreas y terrestres híbridas han surgido recientemente para la seguridad pública y las comunicaciones militares. De hecho, existe la necesidad de desplegar rápidamente una red que sea capaz de proporcionar una gran cobertura de varias decenas de kilómetros a la vez que proporciona una gran capacidad para cada usuario. Mientras que en el pasado la investigación se enfocaba en plataformas de alta altitud (HAP), en los últimos años, se han investigado muchos tipos de Plataformas de Baja Altitud (LAP) para operar entre varios cientos o pocos miles de metros. Este nuevo proyecto, llamado Estaciones Base Aéreas con Enlaces Oportunistas para Eventos Inesperados y Temporales está financiado por el Programa específico "Cooperación": Tecnologías de la Información y la Comunicación (FP7-ICT) de la Comisión Europea. El proyecto ABSOLUTE está dirigido por "Thales Communications and Security", de París [16].

El proyecto ABSOLUTE está pensado en diseñar y validar una arquitectura innovadora de red de despliegue rápido que es resistente y capaz de proporcionar conectividad de banda ancha multiservicio, segura y confiable para grandes áreas de cobertura afectadas por eventos inesperados a gran escala (o desastres) que

conducen a la parcial o completa falta de disponibilidad de la infraestructura de comunicación terrestre o eventos temporales que conducen a la demanda de un rendimiento muy elevado y una capacidad de red aumentada. El proyecto demuestra las capacidades de alta demanda, baja latencia y cobertura de las soluciones 4G adaptadas para comunicaciones de emergencia de banda ancha dentro de escenarios de mitigación de desastres a través de estaciones base flexibles integradas en plataformas aéreas y estaciones terrestres móviles.

El objetivo final en ABSOLUTE es proporcionar implementaciones de referencia para soluciones compatibles e interoperables y normativas relevantes, permitiendo la adopción rápida de tecnologías de comunicación 4G para mejorar notablemente la recuperación ante desastres y la preparación para la gestión de crisis de todas las partes interesadas relevantes de seguridad y protección pública en Europa y en todo el mundo. Los elementos funcionales y las respectivas mejoras de la arquitectura de red se basan en el análisis de requisitos de usuarios y partes interesadas y en el posicionamiento europeo para la estrategia de espectro de banda ancha para la seguridad pública y la evolución tecnológica con retroalimentación de estandarización para la armonización de PPDR y servicios PPDR de banda ancha. El diseño y desarrollo de los AeNB 4G autónomos en ABSOLUTE claramente tendrá un impacto para el panorama de las comunicaciones de seguridad pública y, en particular, para una adopción y madurez más rápidas de los sistemas basados en LTE-A para despliegues de misión crítica [22].

### 3.3 Implementación

El proyecto ABSOLUTE diseñó y demostró una arquitectura de red innovadora de despliegue rápido, que es capaz de proporcionar servicios multimedia de banda ancha y conectividad confiable para grandes áreas afectadas por desastres inesperados o eventos temporales. Las plataformas aéreas y terrestres de despliegue rápido son los componentes clave del sistema ABSOLUTE.

Estas deben proporcionar cobertura de radio de área amplia con muchas aplicaciones integradas en equipos de fácil y rápido despliegue, adecuadas para áreas inhóspitas o de difícil acceso. Además, en adición, se desarrollaron conceptos

innovadores como el Núcleo de paquete evolucionado independiente (EPC), mecanismos cognitivos para la gestión dinámica del espectro, la reconfiguración de la red, así como mecanismos de red oportunistas y cooperativos que maximizan la disponibilidad y fiabilidad del sistema [17].

### 3.3.1 Arquitectura Aero-terrestre del sistema

La arquitectura del sistema incluye los siguientes componentes de red y se pueden observar en la Figura 3.2 [16] [17] [21]:

- **Estación base aérea (AeNB):** Es la plataforma aérea desplegada utilizando unidades aéreas portátiles equipados con la carga útil del equipo de radio LTE y capaz de actuar como estación base.
- **Unidad móvil terrestre portátil (PLMU):** Es la plataforma terrestre autónoma caracterizada por una carga útil que puede albergar varias tecnologías de comunicación tales como Wi-Fi, LTE y satélite. Las PLMU también amplían la cobertura y capacidad de AeNB actuando como una estación base terrestre. Para las situaciones en las que la AeNB no es necesaria, como en operaciones de área pequeña, la cobertura también puede ser proporcionada por PLMU.
- **Equipo de usuario multimodo (MM-UE):** Es una terminal capaz de soportar múltiples tecnologías de acceso por radio y servicios adicionales para organizaciones de salvamento. Tal dispositivo se asocia con AeNB o PLMU para comunicarse con el centro de control a través de enlaces de comunicación 4G, Wi-Fi o por satélite. Estos son terminales profesionales multiservicio para los servicios de respuesta rápida (policías, bomberos, protección civil).
- **Funcionalidades de retornos (*backhauling*) de satélite:** Para los subsistemas AeNB y PLMU, se logran por medio de un enlace de banda ancha en la banda Ka con un satélite geoestacionario.

Esto ofrece a los usuarios del sistema una conexión confiable y resistente a la sede de servicio e Internet.

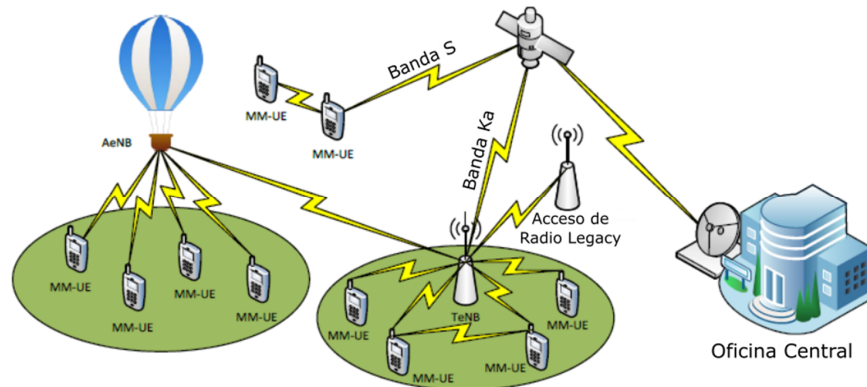


Figura 3.2: Arquitectura Aero-terrestre ABSOLUTE.

### 3.3.2 Requerimientos de usuario

Existe un Consejo Asesor Externo (EAB) parte del proyecto ABSOLUTE. Esta junta está compuesta por organizaciones de seguridad pública como el Ministerio de Defensa en España, la Gendarmería en Francia, la Agencia Federal de Asistencia Técnica (HTW) en Alemania, el Consejo de Autoridades de Servicios de Emergencia e Incendios de Australia y la Inspección Rumana para Situaciones de Emergencia.

La función del EAB es proporcionar orientación para asegurar que los resultados del proyecto satisfagan las necesidades del usuario final. EAB produce requisitos de usuario que son la base para el desarrollo del sistema ABSOLUTE.

Con respecto a las necesidades de comunicación en un área de percances o eventos a gran escala, la voz sigue siendo la prioridad, pero existe una demanda de nuevos servicios que incluyen, transmisión de video en vivo, geolocalización o acceso a internet.

Estos servicios requieren cada vez más recursos de comunicación. Por este motivo, se elige una tecnología 4G, como LTE (de la versión 8 y superior) para proporcionar una velocidad de datos alta. Esto le permite hacer frente a una gran cantidad de usuarios.

### 3.3.3 Plataformas de baja altitud

Posicionar una estación base 4G a una altitud significativa aumenta la línea de visión de la radio en comparación con estaciones bases convencionales. Las BS móviles más altas tiene unos 30 metros de altura. Esto proporciona una línea de visión de radio de aproximadamente 27 kilómetros. El proyecto ABSOLUTE eleva la antena 4G a 300 metros. Esto da una cobertura mayor de recepción de radio en terreno llano. Además, la plataforma de baja altitud (LAP) se encuentra muy por encima incluso de los árboles más altos y también puede proyectarse sobre numerosas colinas cercanas. En la práctica, se encuentra que en la provisión de comunicaciones de radio fiables es mucho mejor las LAP a 300 metros de altura en comparación con cualquier BS convencional.

Las comunicaciones tácticas requieren un lanzamiento rápido y confiable de la plataforma aérea a la altitud óptima. Además, la plataforma aérea debe permanecer estable y en un solo lugar en todas las condiciones de clima durante períodos prolongados. Todos los tipos de plataformas de baja altitud se consideraron como parte del proyecto ABSOLUTE. Aviones tripulados, UAVs, BSs, globos de helio, globos aerostáticos y dirigibles. Una plataforma elegida es la llamada Helikite®, que actualmente presta servicios en el ejército de los EE. UU. En la Figura 3.3 se ilustran estas variantes a Helikite.



*Figura 3.3: Distintas arquitecturas consideradas para la implementación de las AeNBs.*

Las Helikites combinan un globo de helio y una cometa en una unidad aerodinámica estable. Este es un diseño revolucionario de aerostato. Las Helikites pequeñas y fáciles de manejar pueden transportar constantemente cargas útiles de radio o cámara, además de antenas a altitudes en condiciones climáticas muy difíciles. La Helikite se queda en un lugar y altitud a menos que el viento cambie de dirección, lo cual es muy ventajoso para el enlace de radio. Además, de igual importancia es el hecho de que los helikites vuelan con el mismo ángulo de actitud, independientemente de si hay viento o no. Esto es fundamentalmente importante para garantizar que las antenas permanezcan verticales en todas las condiciones, garantizando así una propagación óptima [16] [17].

### 3.3.4 Evaluación del rendimiento

Como se ha indicado anteriormente, la configuración de la red es proporcionada por su arquitectura aérea-terrestre compuesta de plataformas aéreas y PLMU terrestres, que actúan como enlaces de los MMUE. El rendimiento de la PLMU ha sido evaluado por investigadores tanto en el laboratorio como en el campo.

Se han medido diferentes métricas, que van desde los servicios y el rendimiento de la aplicación hasta la eficiencia de las redes de comunicación inalámbricas. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.1. Los resultados que se muestran se obtienen sin ninguna optimización de la frecuencia de radio (es decir, sin amplificadores de potencia dedicados y antenas específicas) [17].

*Tabla 3.1: Mediciones del desempeño la PLMU.*

Tipo de comunicación	Tecnología	Radio de la celda (m)	Tasa de transferencia (Mbs)	
			UL	DL
SatCom	DVB-like	NA	8.4	18.5
WiFi	IEEE 802.11	450	29.8	31.9
3G	HSPA	600	3.9	17.9
4G	LTE Rel. 8	650	19.5	61.6

### 3.4 Ventajas y retos futuros

Algunas de las ventajas de un sistema de telefonía con estaciones bases aéreas y móviles, son en realidad mejoras a los inconvenientes que presentan las redes a las que pretenden mejorar, a continuación, se presenta las ventajas más acordes con la visión de una mejora en el desempeño de una red celular 4G [16].

#### **Incremento de Tasa de datos**

Los actuales sistemas de radio de emergencia, como TETRA, solo proporcionan una velocidad de datos extremadamente baja (3.5 Kbps). En comparación, el sistema ABSOLUTE Helikite 4G proporcionará 300 Mbps. Esto es 85.714 veces más ancho de banda por segundo. Un ancho de banda alto es muy importante para las operaciones sensibles a la información.

#### **Respuesta de emergencia más rápida**

Las víctimas que pueden estar heridas, pero aún conscientes podrán informar sus lesiones y su posición. Los primeros en responder podrán enviar fotografías de la situación del tránsito, daños al vehículo, heridas humanas y las caras de las víctimas para su identificación. Esto ayuda enormemente a la correcta planificación e implementación por parte de los especialistas en gestión del tráfico, la policía y los gobiernos. Ayudará a los conductores a evitar áreas peligrosas o congestionadas, les permitirá a los familiares contactar a las víctimas, y a las ambulancias que lleguen a las víctimas más rápidamente.

El reconocimiento de rostros puede facilitar que los hospitales averigüen si las víctimas tienen una historia relevante previa, como diabetes, alergias, tipo de sangre, etc. Se les puede informar a los parientes, quienes luego podrían brindar más información.

### **Transmisión de vídeo de incidentes de tráfico**

Los controladores de tráfico pueden ver el movimiento del tráfico en las carreteras secundarias de la misma manera que en las autopistas que actualmente están cubiertas por cámaras CCTV. Esta información instantánea mejoraría las medidas de control de tráfico al permitir cambios oportunos y correctos a los letreros e instrucciones de desvío a los oficiales de control de tráfico en el terreno.

La estación base ABSOLUTE 4G aérea también permitiría que las cámaras de video terrestres transmitan sus videos a muchas millas de distancia a través de la estación base 4G de gran altitud. Esto significa que los teléfonos móviles se pueden usar como cámaras de video de emergencia para monitorear el tráfico. Un oficial de tráfico puede señalar su teléfono móvil en un incidente y hacer que sea visto por cualquiera o por todos en prácticamente cualquier lugar, en tiempo real.

Por último, existen retos para este tipo de redes, que suponen un obstáculo al momento de implementar una red móvil, siendo el principal, el consumo de energía [16].

### **Consumo de energía**

Las radios y los transmisores requieren potencia, pero también funcionan mucho mejor a gran altitud. Hay un equilibrio entre la mayor potencia y la mayor altitud. Se decidió que el uso de baterías de litio era una mejor solución general que llevar la energía a la BS aérea a través de pesados cables de cobre. Especialmente si la LAP es muy rápido y fácil de iniciar y recuperar, por lo tanto, permite que ocurra un solo cambio diario de la batería en pocos minutos. Esto por supuesto, supone una interrupción temporal a la cobertura de la BS aérea, sin importar el tipo de plataforma utilizada, en el caso de un dron, el problema es el mismo, ya que también necesita cargarse si este se queda sin energía.

**Antenas**

El diseño, la configuración y la ubicación de la antena en la LAP es importante. La optimización de la ganancia de la antena permite recoger señales de radio relativamente débiles de teléfonos móviles desde muchos kilómetros de distancia. Una mejor transmisión del LAP permite una menor demanda de potencia, un mayor alcance y una mayor resistencia a interferencia. En el caso de Helikite, permite que la antena se mantenga en la actitud correcta sea cual sea el clima o la altitud. Helikites puede llevar antenas de tamaño considerable y de muchas formas si es necesario. Por lo tanto, es posible probar de manera confiable varias antenas a diferentes altitudes para determinar la configuración más adecuada.

# Capítulo 4

## Precedentes OFDMA

### 4.1 Redes 4G que utilizan el esquema de acceso OFDMA

En el capítulo anterior se habló de como los prestadores de servicios móviles invierten en las tecnologías 4G para la implementación de sus redes, dos de esas tecnologías son LTE y WiMax, LTE siendo una tecnología ampliamente usada por las operadoras en el país, como lo son Telcel, Movistar y AT&T. LTE no es la única solución para la entrega de servicios móviles de banda ancha. Varias soluciones patentadas, particularmente para aplicaciones fijas, ya están en el mercado. De hecho, existen soluciones alternativas basadas en estándares que se superponen al menos parcialmente con LTE, especialmente para las aplicaciones portátiles y móviles. A corto plazo, la más significativa de estas alternativas son los sistemas celulares de tercera generación y sistemas Wifi basados en la norma IEEE 802.11. [23]

A continuación, se describen los puntos más importantes de estas dos tecnologías de redes 4G.

### 4.1.1 LTE

La banda ancha móvil LTE es popularmente llamada 4G, desarrollada por Third Generation Partnership Project (3GPP) y adoptada por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI). En realidad, el objetivo del proyecto LTE es tener un rendimiento promedio del usuario de tres a cuatro veces los niveles HSDPA (versión 6) en el enlace descendente (100 Mbps) y dos o tres veces los niveles HSUPA en el enlace ascendente (50 Mbps). En 2007, pasó de la etapa de estudio de factibilidad al primer número de especificaciones técnicas aprobadas. A finales de 2008, las especificaciones eran suficientemente estables para la primera ola de equipos LTE (versión 8). Sin embargo, algunos beneficios adicionales de pequeñas mejoras se introdujeron en la versión 9, una versión que se congeló funcionalmente en diciembre de 2009. La motivación para 3GPP para la versión 8 es [23]:

- Necesidad de garantizar la continuidad de la competitividad del sistema 3G para el futuro;
- La demanda del usuario de mayores velocidades de datos y calidad del servicio.
- Sistema optimizado de Conmutación de Paquetes (Packet Switch).
- Demanda continua de reducción de costos.
- Baja complejidad.
- Evitar la fragmentación innecesaria de las tecnologías para la operación de banda emparejada y no emparejada.

En septiembre de 2009, los socios de 3GPP presentaron formalmente al ITU, proponiendo que LTE en su versión 10 y posteriores (LTE-Advanced) fueran evaluados como candidatos para IMT-Advanced. La ITU ha acuñado el término IMT-Advanced para identificar sistemas móviles cuyas capacidades van más allá de las de IMT-2000. Para cumplir con este nuevo desafío, los socios de la organización 3GPP han acordado ampliar el alcance de 3GPP para incluir el desarrollo de sistemas más allá de 3G. Algunas de las características clave de IMT-Advanced serían [24]:

- Funcionalidad y roaming en todo el mundo.
- Compatibilidad de servicios.

- Interoperabilidad con otros sistemas de acceso de radio.
- Tasas máximas de datos mejoradas para admitir aplicaciones y servicios avanzados (100 Mbs para alta y 1 Gbs para baja movilidad).

Además del conjunto de características anteriores, una de las principales razones para alinear LTE con la convocatoria de IMT-Advanced es que los sistemas bajo IMT serán candidatos para futuras bandas de espectro nuevas que se identificarán en WRC07. LTE es una solución de banda ancha móvil que ofrece un amplio conjunto de características con mucha flexibilidad en términos de opciones de implementación y posibles ofertas de servicios. Algunas de las características se mencionan a continuación:

**OFDMA para alta eficiencia espectral es la base de la capa física:** OFDMA se utiliza en el enlace descendente para obtener una robustez contra interferencia multitrayecto y alta afinidad a técnicas avanzadas tales como programación dependiente del canal de dominio de frecuencia y MIMO, mientras que el Acceso Múltiple por División de Frecuencia de una Sola Portadora (SC-FDMA) se usa en el enlace ascendente para obtener una relación de potencia pico-a-promedio (PAPR) baja.

**Soporte para TDD y FDD:** LTE es compatible con Duplexaje por División de Tiempo (TDD) y Duplexaje por División de Frecuencia. TDD es favorecido por la mayoría de las implementaciones debido a sus ventajas:

1. Flexibilidad al elegir relaciones de velocidad de datos del enlace ascendente al enlace descendente.
2. Capacidad de aprovechar la reciprocidad del canal.
3. Capacidad de implementar en espectro fragmentado y no apareado.
4. Diseño de transceptor menos complejo.

**Modulación y codificación adaptativa (AMC):** LTE admite una cantidad de esquemas de codificación de corrección de errores de avance y reenvío (FEC) y permite cambiar el esquema por usuario en función de las condiciones del canal. AMC es un mecanismo efectivo para maximizar el rendimiento en un canal que varía con el tiempo.

El algoritmo de adaptación normalmente requiere el uso del esquema de modulación y codificación más alto que puede ser soportado por la relación señal-ruido y la interferencia en el receptor, de modo que cada usuario reciba la mayor velocidad de datos posible en sus enlaces respectivos.

**Soporte de ancho de banda variable:** E-UTRA funcionará en asignaciones de espectro de diferentes tamaños, incluidos 1.25, 1.6, 2.5, 5, 10, 15 y 20 MHz tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. El funcionamiento en espectro pareado y no pareado debe ser compatible. Este escalamiento se puede realizar de forma dinámica para admitir el roaming de los usuarios en diferentes redes que pueden tener diferentes asignaciones de ancho de banda.

**Tasas de datos de pico muy altas:** LTE es capaz de soportar velocidades de datos de pico muy altas. De hecho, la velocidad máxima de datos en la capa física puede ser tan alta como la velocidad de datos pico del enlace descendente de 100 Mbps dentro de una asignación de espectro de enlace descendente de 20 MHz (5 bps/Hz), mientras que proporciona velocidad de datos máxima de enlace ascendente de 50 Mbps (2.5 bps/Hz) dentro de una asignación de espectro de enlace ascendente de 20MHz.

**Movilidad:** E-UTRAN debe optimizarse para una velocidad móvil baja de 0 a 15 km/h. Una mayor velocidad móvil entre 15 y 120 km/h debe ser compatible con un alto rendimiento. La movilidad a través de la red celular se mantendrá a velocidades de 120 a 350 km/h (o incluso hasta 500 km/h dependiendo de la banda de frecuencia).

**Retransmisiones de capa de enlace:** LTE admite solicitudes de retransmisión automática (ARQ) en la capa de enlace. Las conexiones habilitadas para ARQ requieren que cada paquete transmitido sea reconocido por el receptor; Se supone que los paquetes no reconocidos se pierden y se retransmiten. LTE también admite opcionalmente el híbrido ARQ, que es un híbrido efectivo entre FEC y ARQ.

**Soporte de usuario simultáneo:** LTE proporciona la capacidad de realizar una programación bidimensional de recursos (en tiempo y frecuencia), permitiendo el soporte de múltiples usuarios en un intervalo de tiempo; en contraste, la tecnología 3G existente realiza una programación unidimensional, que limita el servicio a un usuario para cada intervalo de tiempo. Esta capacidad de LTE da como resultado

una mejor experiencia permanente y también permite la proliferación de aplicaciones.

**Seguridad:** LTE proporciona una seguridad mejorada mediante la implementación del Módulo de identidad del suscriptor (SIM) UICC y el almacenamiento robusto y no invasivo asociado y la autenticación de clave simétrica utilizando claves privadas de 128 bits. LTE incorpora además una fuerte autenticación mutua, confidencialidad de la identidad del usuario, protección de la integridad de todos los mensajes de señalización entre el UE y la entidad de gestión de la movilidad (MME), y el cifrado de datos de portador multinivel opcional.

**Roaming (“Itinerancia”) mundial eficiente:** debido a que LTE será el estándar 4G unificado para la mayoría de los operadores 3GPP y 3GPP2 en todo el mundo, los dispositivos LTE serán fundamentalmente más fáciles de configurar para el roaming mundial. La contraparte es que la banda de frecuencia real utilizada por diferentes operadores será diferente (conservando así la necesidad de dispositivos multibanda) [23].

#### 4.1.2 WiMAX

WiMAX es un consorcio de distintas empresas que se formó en abril del año 2001 con un objetivo claro que era asegurarse de la interoperabilidad y mantenimiento de la norma 802.16-2001 por parte de los productos de acceso de banda ancha inalámbricos. Las organizaciones fundadoras fueron Ensemble, CrossSpan, Harris y Nokia. Más tarde se unieron el OFDM Forum y Fujitsu, ambos en el año 2002; y no fue hasta marzo del 2003, después de algunos esfuerzos por parte de los que ya estaban dentro, cuando se unieron a WiMAX, empresas como Aperto, Alvarion, Proxim o Intel entre otras. Actualmente WiMAX cuenta con más de 400 miembros con una fuerte representación de proveedores de servicios, fabricantes de sistemas o vendedores de chip. [25]

El acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) comenzó con un acceso fijo en mente para competir con DSL y cable módem, ya que el rápido crecimiento del acceso de banda ancha ha creado la demanda de nuevas tecnologías inalámbricas para reducir el costo de operación y el monopolio de proveedores de servicios acceso

a línea cableada. Actualmente, WiMAX Forum introdujo dos perfiles de sistema, el perfil de sistema fijo basado en la capa física OFDM IEEE 802.16-2004 y perfil de sistema móvil basado en la capa física OFDMA escalable IEEE 802.16e-2005.

WiMAX móvil ha evolucionado desde el acceso inalámbrico fijo y hereda sus características para optimizar los servicios de datos de banda ancha. Los estándares EV-DO y HSPA, 3G CDMA, han sido concebidos originalmente para servicios de voz móviles e implementan tanto las ventajas como las limitaciones de los sistemas 3G heredados. En consecuencia, WiMAX móvil se enfrenta al desafío de admitir la movilidad, mientras que los sistemas 3G se enfrentan al desafío de soportar velocidades de datos más altas.

La interfaz aérea de Mobile WiMAX utiliza OFDMA como su método de múltiple acceso en el Enlace de bajada (DL) y enlace de subida (UL) mejorando el rendimiento multitrayecto y la escalabilidad del ancho de banda. También proporciona mayores velocidades de datos con soporte OFDMA e introduce varias características clave necesarias para brindar movilidad a velocidades vehiculares con QoS comparable a las alternativas de acceso de banda ancha. Varias funciones que se utilizan para mejorar el rendimiento de datos son afines a EV-DO y HSPA: Adaptive Modulation and Coding (AMC), ARQ-Híbrido, programación rápida y entrega de ancho de banda eficiente\*. La diferencia clave está en la duplexación donde EV-DO y HSPA son FDD que operan en una frecuencia portadora de 2.0 GHz, mientras que WiMAX móvil es actualmente TDD (Duplexación por división de tiempo) que opera a 2.5 GHz. WiMAX móvil tiene una mayor tolerancia a la propagación por multitrayectos y a la auto interferencia, también proporciona acceso múltiple ortogonal en el enlace ascendente con programación selectiva de frecuencias y reutilización de frecuencias fraccionarias.

A diferencia de EV-DO y HSPA, Mobile WiMAX también es capaz de utilizar  $2 \times 2$  MIMO además de  $1 \times 2$  SIMO.

La comparación de rendimiento ha demostrado que en el canal de 10MHz WiMAX móvil tiene un rendimiento de enlace descendente neto de 9 a 14 Mbps con MIMO y de 6 a 9 Mbps con SIMO por canal/sector en comparación con los 4Mbps aproximados con EV-DO Rev-B y HSPA.

Esto conduce a una eficiencia espectral de enlace descendente de alrededor de 1.9 bps/Hz con MIMO, el máximo en comparación con 0.8 bps/Hz con EV-DO Rev-B y HSPA. En consecuencia, se requieren menos estaciones base para alcanzar la densidad de datos deseada.

Existen otros competidores, como se puede observar al inicio de este capítulo, para banda ancha móvil además de WiMAX como LTE (Versión 8) de 3GPP y UltraMobile Broadband (UMB) (anteriormente CDMA2000 1xEV-DO Rev-C) de 3GPP2. Ambas diseñados con la misma interfaz aérea OFDMA que WiMAX.

La selección de OFDMA está impulsada por la demanda de mayor eficiencia espectral y bajo costo por bit, ya que el problema básico para un proveedor de servicios es obtener más datos para los usuarios, de manera más rápida y económica. Debido a que WCDMA tiene una restricción para escalar en ancho de banda, se selecciona OFDMA. OFDMA resuelve este problema dividiendo el flujo de datos de alta velocidad en varios flujos de datos de menor velocidad y enviando los flujos de velocidad más bajos en canales de frecuencia individuales. En el receptor, el usuario recombina estos flujos más bajos para construir un flujo de datos de alta velocidad. Además de la tecnología OFDMA, los tres se basan en servicios IP sin retro compatibilidad para los servicios de conmutación de circuitos [26].

## 4.2 El Estándar IEEE 802.16

Los antecedentes de estas tecnologías se encuentran en los sistemas LMDS (Local Multipoint Distribution System, “*Sistemas de distribución local multipunto*”). Su propósito es proporcionar un servicio de comunicación inalámbrica para voz, internet, video bajo demanda, etc. con amplia cobertura.

Posteriormente el IEEE formo un comité para desarrollar el estándar que se denominó IEEE 802.16, iniciando trabajos en julio de 1999 y siendo aprobado en abril de 2002. Su nombre oficial “*Air Interface For Fixed Broadband Wireless Access Systems*”, que se relacionó directamente a la clasificación de redes MAN.

Dicho estándar establece las características de las PHY (*Capa Física*) y MAC (Control de Acceso al Medio) para la tecnología denominada comercialmente como WiMAX. Ambas son parte de las dos capas más bajas (física y enlace de datos) definidas por el modelo OSI.

El estándar IEEE 802.16 forma parte de la familia de estándares para redes de área local y metropolitana del IEEE, este estándar especifica una interfaz aérea para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, en su versión de 2004 (IEEE 802.16-2004) especifica dicha interfaz, incluyendo la capa de control de acceso al medio y distintas especificaciones de capa física para sistemas BWA (*Acceso de Banda Ancha Inalámbrica*) fijos soportando servicios múltiples. [27]

La Figura 4.1 muestra la evolución de la norma a través de sus constantes revisiones.

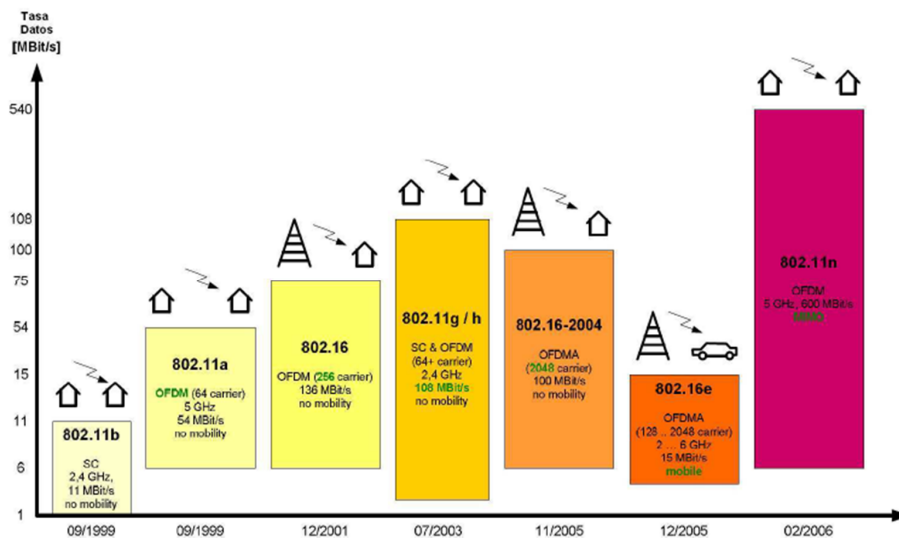


Figura 4.1: Evolución de la norma IEEE 802.11 y 802.16 a lo largo del tiempo.

El estándar comenzó con la revisión 802.16a, que se aprobó en diciembre del año 2001, la cual se centraba en definir el acceso de banda ancha fijo.

Para septiembre de 2003, la revisión IEEE 802.16d consiguió acercarse al estándar europeo HIPERMAN, esta concluyo con la revisión 802.16-2004, en la cual se definía también de forma más concreta la manera de dar soporte al punto de acceso por parte del usuario, como un posible modem, o aparatos que entendieran esta norma. Para la versión del año 2004 se consolidan las revisiones IEEE 802.16, IEEE 802.16a y IEEE 802.16c, manteniendo todos los modos y características principales sin añadir nuevos. El objetivo era permitir el desarrollo rápido de productos BWA de distintos fabricantes, innovadores, con costos competitivos e interoperables, así como facilitar la competencia en accesos de banda ancha proponiendo alternativas a los accesos por cable. [25] [28]

En resumen, las revisiones y sus características más importantes se definen a continuación en la Tabla 4.1 [36]:

*Tabla 4.1: Características básicas de las revisiones en la norma IEEE 802.16.*

<b>Nombre de la revisión</b>	<b>Fecha de la revisión</b>	<b>Descripción</b>
802.16	Diciembre 2001	10-66 GHz, LOS, cobertura 2-5 Km ; Anchos de banda: 20, 25, 28 MHz.
802.16a	Enero 2003	2-11 GHz, NLOS
802.16-2004	2004	Consolidación de revisiones anteriores, cobertura 5-50 Km.
2016.16e	Diciembre 2005	Movilidad, OFDMA
802.16f, 802.16g	-	Aspectos de Handover, información de administración.

En diciembre de 2005 se aprueba la revisión IEEE 802.16e (también conocida como IEEE 802.16e o Mobile WiMax).

Esta proporciona mejoras al estándar para soportar estaciones suscriptoras que se muevan velocidades vehiculares con hasta velocidades de 180 Km/h y para ello define un sistema combinado fijo-móvil para el acceso inalámbrico de banda ancha, gracias a las elevadas tasas de transmisión garantizadas de hasta 75 Mbps también se especifican funciones para soportar el handover entre las estaciones

bases, todo esto limitado a bandas con licencias apropiadas para movilidad por debajo de los 6Ghz [25].

La Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 describen los perfiles de sistema y certificación estandarizados para el estándar IEEE 802.16 promovidos por WiMax Forum [27] [36].

*Tabla 4.2: Perfiles de sistema de WiMax Forum.*

<b>Perfiles de sistema</b>	<b>WiMax Fijo</b>	<b>WiMax Evolucionado</b>	<b>WiMax Movil</b>
<b>Estándar base</b>	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	IEEE 802.16e-2005
<b>Multiplexación FFT</b>	OFDM 256	OFDM 256	OFDMA 512, 1024, 2048
<b>Duplexión</b>	TDD, FDD, HFDD	TDD	TDD
<b>Modulación</b>	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM (opcional)	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM (opcional en UL)

Tabla 4.3: Perfiles de certificación de WiMax Forum.

Perfiles de certificación	Bandas de frecuencia	Duplexión	BW del canal
WiMax Fijo	3.4 – 3.6 GHz	TDD	3.5 MHz 7 MHz
		FDD	3.5 MHz 7 MHz
WiMax Evolucionado	4.935 – 4.990 GHz	5.725 – 5.850 GHz TDD	10 MHz
		TDD	10 MHz
WiMax Movil	2.3 – 2.4 GHz	TDD	5.10 MHz (dual)
			8.75 MHz
			5.10 MHz (dual)
	2.496 – 2.690 GHz		5 MHz
	3.4 – 3.6 GHz		7 MHz

El estándar IEEE 802.16 especifica la interfaz de radio para redes de área metropolitana de tipo WMAN, esta tecnología define el acceso inalámbrico de banda ancha, por lo que es una buena solución cuando se quiere dotar de banda ancha a zonas rurales donde no existe acceso a redes cableadas. Es posible dotar de una antena a un edificio convirtiéndola en una SS (*Estación Suscriptora*) y hacer que se comunique con una BS como se muestra en la Figura 4.2, los usuarios se pueden conectar a esta estación base pasando por la estación suscriptora con una red doméstica normal (modem), o bien, conectarse directamente a la estación base.

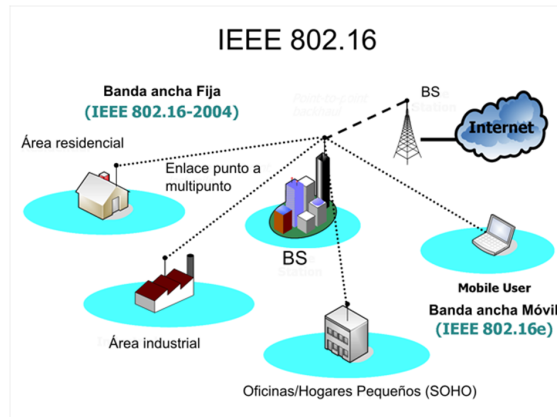


Figura 4.2: Ejemplo de la arquitectura para redes WiMax.

Como esta a su vez, soporta servicios de voz a un alto régimen binario, puede ser considerada también una alternativa a las redes de telefonía celular. Las diferentes topologías de red utilizan distintas capas PHY (nivel físico OSI), pero gracias al nivel MAC del estándar IEEE 802.16 pueden formar, independientemente de su correspondiente capa PHY, una conexión sin degrado de la calidad en el servicio (QoS) [28].

#### 4.2.1 Topologías WiMax

Existen las siguientes topologías de red definidas para el estándar 802.16 [27]:

**PTP (Point to Point).** Es posible desplegar una red cableada dedicada a la interconexión de estaciones base, o realizar conexiones en base a la banda de microondas, o incluso emplear WiMax para estas conexiones punto a punto entre las estaciones base. Las estaciones base son capaces de soportar su propia interconexión dividiendo el ancho de banda disponible entre el dedicado a las comunicaciones de los suscriptores (usuarios) y el dedicado a la interconexión entre las diferentes estaciones base. La Figura 4.3 muestra una topología PTP desplegada inalámbricamente.

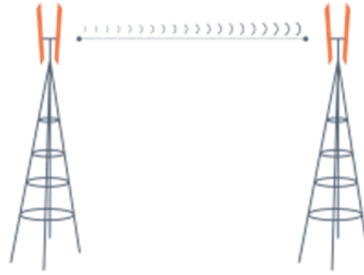


Figura 4.3: Topología Punto a Punto.

**PMP (Point to Multipoint).** El tráfico de datos en la red solo se da entre la estación base y las estaciones suscriptoras, es una topología centralizada donde la estación base es el centro del sistema. Para las redes de telefonía celular, uno o más suscriptores (usuarios de computadoras portátiles, teléfonos, etc.) en un área geográfica determinada, se conectan a una estación base celular. La estación base controla las transmisiones. El punto en una red PMP es la estación base y el multipunto son los suscriptores que pueden ser fijos, o móviles. El punto de la BS controla el acceso. La Figura 4.4 muestra una topología PMP básica entre dispositivos móviles, y otros SS WiMax.

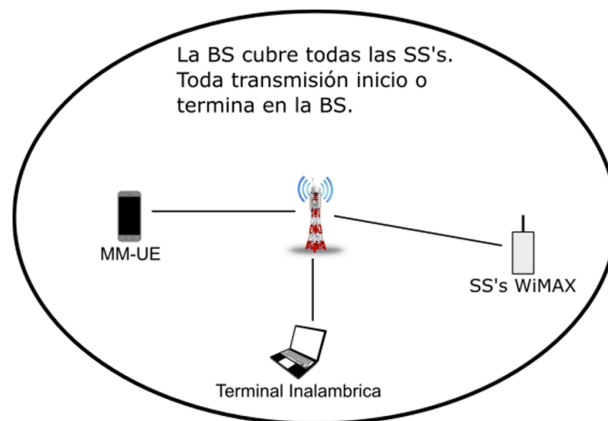


Figura 4.4: Topología Punto a Multipunto.

Algunos ejemplos de aplicaciones de PMP:

- Proveedores de servicios de Internet inalámbricos (WISP)

- Monitoreo y vigilancia de video (CIS).
- Servicios públicos y fabricación: para llevar el tráfico SCADA (control de supervisión y adquisición de datos) a estaciones de monitoreo.

**Mesh (Malla).** El tráfico de datos en la red puede ser ruteado entre suscriptores, cada suscriptor es capaz de establecer enlaces con otros suscriptores adyacentes, logrando así, varias alternativas de enlaces antes de llegar al punto origen de la red. Existen algoritmos de enrutamiento que son capaces de direccionar las comunicaciones por el camino más adecuado en un momento determinado, si un enlace deja de funcionar, la red sigue funcionando por enlaces alternativos.

Los elementos de esta topología se denominan nodos. Cada nodo recibe un identificador de 16 bits o Node ID. En la Figura 4.5 las SS interconectadas son los nodos de la red [27] [29].

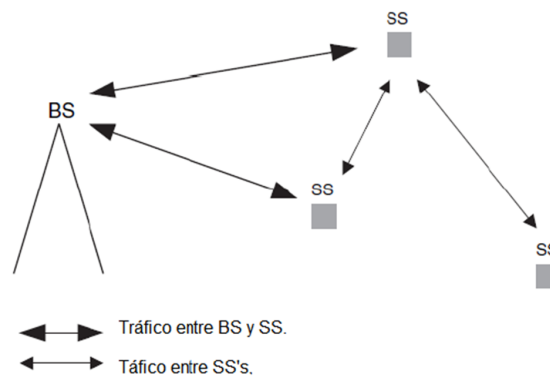


Figura 4.5: Topología Malla.

### 4.2.2 Capa física (PHY)

La capa física establece la conexión física entre dos sitios, y frecuentemente en ambas direcciones (Uplink y Downlink). También define qué tipo de modulación se utilizará para transmitir las secuencias de bits, la potencia de transmisión, y otras

características físicas. Incluye principalmente tres especificaciones, que se adaptan a diferentes entornos operativos.

Para frecuencias de 10 a 66 GHz, el estándar recomienda Wireless MAN-SC PHY, donde SC significa modulación de portadora única. El ancho de banda de canal típico es de 25 MHz o 28 MHz, y las velocidades de datos en bruto pueden superar los 120 Mb/s. Este entorno es adecuado para el acceso punto a multipunto (PMP) que sirve aplicaciones en interiores, como Oficinas Pequeñas u Oficinas Hogareñas (SOHO), o áreas de oficinas más grandes.

Para la banda de frecuencia por debajo de 11 GHz, se especifican dos alternativas: Wireless MAN-OFDM y Wireless MAN-OFDMA. En este rango de frecuencia, la longitud de onda es relativamente larga, y, por lo tanto, es un entorno NLOS con multitrayectos significativos. Los enfoques comunes para mitigar la interferencia entre símbolos (ISI) causada por propagación multitrayecto son OFDM y OFDMA [27] [37]. La Tabla 4.4 define las diferentes interfaces físicas que propone el estándar IEEE 802.16, su banda de frecuencia, así como la técnica de duplexión usada [36].

*Tabla 4.4: Interfaces físicas (PHY) del estándar IEEE 802.16*

<b>Denominación</b>	<b>Banda de Frecuencia (GHz)</b>	<b>Sección del estándar 802.16</b>	<b>Técnica de duplexión</b>
Wireless MAN-SC PHY	10-66 GHz, LOS	8.1	TDD y FDD
Wireless MAN-SCa PHY	Después de los 11 GHz, NLOS	8.2	TDD y FDD
Wireless MAN OFDM	Después de los 11GHz, licenciado.	8.3	TDD y FDD
Wireless-OFDMA	Después de los 11GHz, licenciado.	8.4	TDD y FDD
Wireless HUMAN	Después de los 11GHz, no licenciado.	8.5 (junto con 8.2, 8.3u 8.4)	TDD

### 4.2.3 Capa MAC

Para garantizar la interoperabilidad entre los distintos estándares, WiMax define una capa MAC única capaz de soportar distintas interfaces de nivel físico (PHY), estos se comunican a través de los PHY-SAP (*Punto de Acceso al Servicio*) con la capa MAC. En la Figura 4.6 se muestra que la capa MAC está integrada por 3 subcapas:

1. La Subcapa de Convergencia de Servicio Especifico (CS).
2. La Subcapa de Parte Común de Control de Acceso al Medio (MAC CPS).
3. La Subcapa de Seguridad.

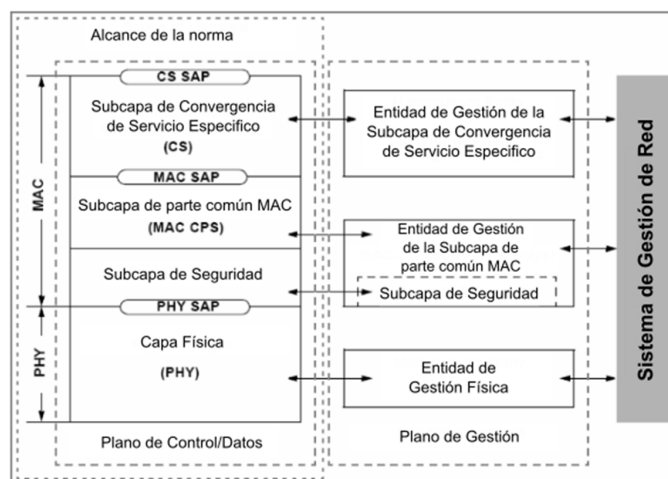


Figura 4.6: Torre de protocolo MAC WiMax.

El estándar IEEE 802.16 define un MAC orientado a la conexión y el mecanismo de señalización para el intercambio de información entre la estación base y la estación del suscriptor. La CS realiza la transformación y el mapeado de los datos recibidos de los niveles superiores a través de CS SAP para formar las MAC PDU (*Unidad de Datos del Protocolo*) enviadas a la MAC CPS a través del MAC SAP y viceversa.

La CS lleva a cabo la clasificación de las SDU (*Unidad de Datos del Servicio*) de la red externa asociándoles un CID (*Identificador de Conexión*) y su correspondiente SFID (*Identificador del Flujo de Servicio*). Esta también puede incluir funciones como la supresión de cabeceras.

La MAC CPS provee las funcionalidades de la subcapa MAC, como es el acceso de un sistema al canal, la asignación del ancho de banda o la creación y mantenimiento de un enlace. Esta recibe los datos de las distintas CS a través del MAC SAP, además, existen mecanismos para diferenciar la QoS en función de las distintas necesidades ligadas a las distintas aplicaciones. La QoS se aplica a la transmisión fijando los datos a la capa física, de este modo se hace más eficiente el sistema en lugar de utilizar más capas de control por encima de la capa MAC. La subcapa de seguridad provee la autenticación, el intercambio y el cifrado de la clave de seguridad.

La subcapa MAC CPS transmite los datos, el control de la capa física y las estadísticas al nivel físico a través del PHY SAP. El estándar ha sido pensado para desarrollarse como un conjunto de interfaces de radio basadas sobre un único protocolo MAC, a su vez, también incluye múltiples especificaciones de capa física, cada una adaptada a un rango de frecuencias particular y una aplicación en concreto [27] [28] [30] [36].

#### **4.2.4 La interoperabilidad de WiMax y WiFi**

WiMax se considera un estándar revolucionario por los múltiples servicios que ofrece, pero, sobre todo, por la interoperabilidad con la mayor parte de estándares ya existentes. Por eso resulta necesario crear un organismo que verifique dicha interacción del estándar, en consecuencia, se crea el foro WiMax (WiMax Forum) en junio de 2001. Integrado por fabricantes de equipos, operadores de redes, académicos y gente a fin al campo de las telecomunicaciones, tiene como objetivo facilitar el desarrollo de las redes inalámbricas de banda ancha basadas en el estándar, asegurando que se mantenga la compatibilidad e interoperabilidad.

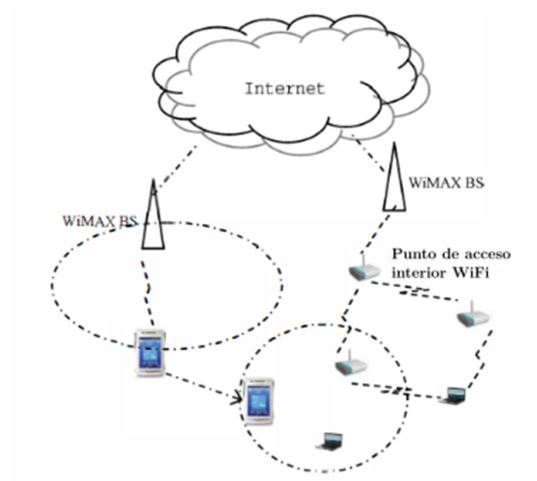
WiMax constituye un complemento a WiFi (IEEE 802.11) dado que las redes del protocolo IEEE 802.16 utilizan el mismo protocolo LLC (*Control de nivel de enlace*) que el resto de las redes LAN o WAN, estas pueden ser conectadas entre sí, y servir de canalizaciones comunes. Esta complementariedad se extiende a las modalidades de ethernet sobre cableado físico (IEEE 802.3), token ring (IEEE 802.5), así como a estándares ajenos a la IEEE que usan el mismo protocolo LLC. WiMax constituye una alternativa a las conexiones cableadas o DSL para el acceso de banda ancha ya que puede conectar los puntos de acceso WiFi a internet. La capa MAC en WiMax es significativamente distinta de la de WiFi. [28]

El WiFi actualmente se usa en la comunicación VoIP (*Voz sobre IP*) de acceso a Internet con una velocidad de 54 Mbps y un alcance de alrededor de 30 metros. Por otro lado, WiMAX es la tecnología inalámbrica WMAN de alta velocidad.

Es un estándar que se construye con la intención de proporcionar conectividad inalámbrica de larga distancia con una velocidad de datos teórica de 70 Mbps con un alcance de 112 km. Sin embargo, la velocidad de datos alcanzable con la versión actual es de 10 Mbps en un rango de 2 km. A diferencia de WiFi, la tecnología WiMAX es lo suficientemente eficiente como para reemplazar los módems DSL para conectar diferentes ubicaciones remotas sin degradación de QoS.

A pesar de la alta velocidad de datos y la cobertura de larga distancia, el WiMax no se usa ampliamente como Wi-Fi. La razón principal es el costo elevado en la implementación de WiMAX, que se debe a la banda de frecuencia con licencia. Sin embargo, dado que la banda de frecuencia utilizada en WiFi es la banda ISM, el costo depende de la configuración de la red WiFi. Por lo tanto, para minimizar el costo de establecer una red inalámbrica conectada, con calidad de servicio, se están integrando WiFi y WiMAX en un solo entorno operativo.

Donde la conectividad al aire libre de larga distancia usará WiMAX y la conectividad interior usará tecnología WiFi. En la cuarta generación, Wi-Fi puede usarse para crear una red de malla para conectar dispositivos entre sí, y WiMAX se puede usar para conectar puntos de acceso WiFi independientes para conectarse a Internet para servicios móviles de datos y telecomunicaciones de alta velocidad. El escenario de implementación mixta de WiFi y WiMAX se muestra en la Figura 4.7 [31].



*Figura 4.7: Implementación mixta de una red Wifi y WiMax.*

# Capítulo 5

## El esquema de acceso OFDMA

### 5.1 Descripción del esquema OFDMA

Entre las diversas técnicas de acceso múltiple conocidas, la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es la más favorecida en los sistemas de transmisión de banda ancha. Ha sido diseñado para ser capaz de superar la interferencia que se genera entre el transmisor y el receptor para aprovechar eficientemente el espectro de frecuencias útiles que podemos observar en la Figura 5.1. OFDMA es similar a OFDM, pero mucho más eficiente al aprovechar el espectro de frecuencias debido a que el espacio entre subportadoras es traslapado ortogonalmente, sin representar pérdida de información gracias a la ortogonalidad [32] [33] [6].

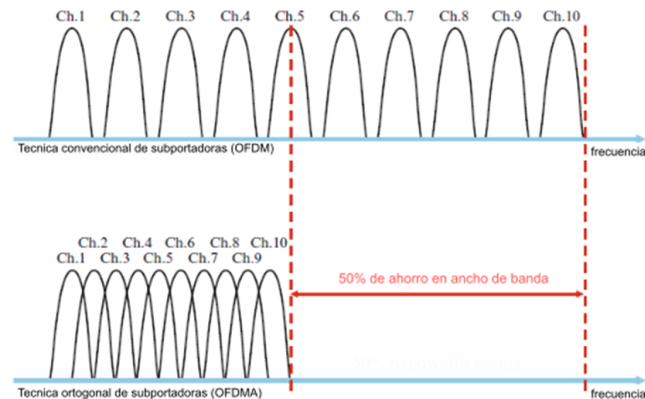


Figura 5.1: Diferencia entre la utilización de subportadoras entre OFDM y OFDMA.

Esta técnica utiliza la FFT (*Transformada Rápida de Fourier*) de un tamaño mayor a OFDM, y divide a las subportadoras disponibles en grupos llamados subcanales (SC). A diferencia de OFDM, el cual transmite la misma cantidad de energía en cada subportadora, OFDMA puede transmitir diferentes cantidades de energía en cada subcanal. Mediante el uso de los subcanales, dentro del mismo intervalo de tiempo, la BS puede asignar más potencia de transmisión a las SS con una SNR más baja y menos potencia a las que tienen una SNR más alta. También permite que la BS asigne una mayor potencia a los subcanales asignados a las SS en interiores, lo que da como resultado una mejor cobertura dentro de un edificio.

Para implementar OFDMA se asignan subconjuntos de portadoras a cada usuario, la asignación de subportadoras por usuario puede variar de acuerdo con las condiciones del canal utilizado o en base a la QoS requerida para cada uno. En un sistema de portadora única, el desvanecimiento o la interferencia causan fallas en cualquier aplicación, pero en un sistema de varias portadoras (subcanal), solo un pequeño porcentaje de esas portadoras desaparecerá. Para corregir las subportadoras con envío de información errónea se utilizan códigos de corrección de error. Es necesario que el transmisor y receptor cuenten con la misma frecuencia de modulación y escala de tiempo para llevar a cabo la transmisión y la recuperación de la información de los usuarios correctamente [6] [26] [33].

## 5.2 Modelado de la eficiencia del sistema OFDMA

Con el objetivo de dar paso a la construcción de la plataforma de simulación para la evaluación del desempeño de la red celular detallaremos los elementos a incluir dentro de este análisis partiendo de la relación señal a ruido.

### 5.2.1 SIR (Signal to Interference Ratio)

Uno de los factores más importantes a considerar durante el diseño de un sistema OFDMA es la cobertura de las estaciones base. Para los sistemas inalámbricos móviles de banda ancha, satisfacer el requerimiento de cobertura significa que el enlace de radio debe cumplir con un cierto valor de SIR mínima requerida, eso significa que el conjunto de estaciones base deben entregar la suficiente potencia de la señal en el área de cobertura, las estaciones base pueden recibir una adecuada potencia en la misma área y cada receptor en el sistema no debe experimentar una interferencia excesiva [6].

La SIR es expresada en la Ecuación 5.1 como:

$$SIR_i = \frac{P_T^{0,i} L_P^{0,i} u_l^{0,i} G(\phi_{o,i})}{\sum_{k=1}^{N_{BS}} P_T^{k,i} L_P^{k,i} u_l^{k,i} G(\phi_{k,i})} \quad (5.1)$$

Donde:

$P_T^{0,i}$  es la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) del i-ésimo usuario respecto a la estación base central.

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

$u_l^{0,i}$  son las pérdidas relacionadas con la propagación, como las pérdidas por oscurecimiento (shadowing) y pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el i-ésimo usuario respecto a la estación base central.

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

$BS$  es el número de estaciones base interferentes.

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

$u_l^{k,i}$  son las pérdidas relacionadas con la propagación, como las pérdidas por oscurecimiento (shadowing) y pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la  $k$ -ésima estación base.

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

$P_T^{k,i}$  es la potencia EIRP (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) de  $i$ -ésimo usuario respecto a la  $k$ -ésima estación base.

Por definición la  $SIR$  se puede expresar como el cociente de la potencia recibida  $P_{Rx}$  y la interferencia recibida  $I_{Rx}$  para el  $i$ -ésimo usuario como se muestra en la Ecuación 5.2 [42][43]:

$$SIR_i = \frac{P_{Rx,i}}{I_{Rx,i}} = \frac{G(\phi_{0,i})u_l^{0,i}/r_{0,i}^u 10^{\zeta_{0,i}/10}}{\sum_{k=1}^{N_{BS}} G(\phi_{k,i})u_l^{k,i}/r_{k,i}^u 10^{\zeta_{k,i}/10}} \quad (5.2)$$

Donde:

$G(\phi_{0,i})$  es la ganancia de la antena de  $i$ -ésimo usuario en el sistema celular respecto a la estación base en el origen.

$u_l^{0,i}$  son las pérdidas causadas por *fastfading* para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la estación base en el origen modeladas con variables aleatorias Rayleigh.

$r_{0,i}^u 10^{\zeta_{0,i}/10}$  son las pérdidas por propagación para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la estación base en el origen, está dada por el producto de la  $\mu$ -ésima potencia de la distancia  $r_{0,i}^u$ , que es la distancia entre el usuario y la estación base central, con una componente log-normal  $10^{\zeta_{0,i}/10}$ , la cual representa las pérdidas por *shadowing*

modeladas en función de la variable aleatoria Gaussiana  $\zeta$  con media cero y desviación estándar  $\Delta$ .

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

$u_l^{k,i}$  son pérdidas causada por *fastfading* para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la  $k$ -ésima estación base de la red celular modeladas por variables aleatorias del tipo Rayleigh.

$r_{k,i}^u \cdot 10^{\zeta_{k,i}/10}$  son las pérdidas por propagación para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la  $k$ -ésima estación base, está dada por el producto de la  $\mu$ -ésima potencia de la distancia  $r_{k,i}^u$ , que es la distancia entre el usuario y la  $k$ -ésima estación base de la red celular, con una componente log-normal  $10^{\zeta_{k,i}/10}$ , la cual representa las pérdidas por shadowing modeladas en función de la variable aleatoria Gaussiana  $\zeta$  con media cero y desviación estándar  $\Delta$ .

## 5.2.2 Interferencia externa

En un sistema móvil OFDMA con múltiples estaciones bases, un usuario puede experimentar interferencia de otras estaciones base. Para calcular la Interferencia para un usuario específico, se parte de la Ecuación 5.3 [6]:

$$I^i = \sum_{j=1}^M P_T^j L_P^j u_g^j u_l^j G_R^j \quad (5.3)$$

Donde:

$M$  es el número de estaciones base interferentes.

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

$P_T^j$  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 ganancias dadas por el sistema como ganancia por macro-diversidad para el j-ésimo usuario.

$u_l^j$  son las pérdidas relacionadas con la propagación, los oscurecimientos lentos (shadowing), pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el j-ésimo usuario.

$G_R^j$  es la ganancia de la antena para el j-ésimo usuario.

### 5.2.3 Ganancia de la antena

La ganancia de la antena en un sistema OFDMA es expresada como se muestra en la Ecuación 5.4, donde  $\phi$  es el ángulo entre el i-ésimo usuario y la dirección de ganancia máxima de la antena,  $q$  representa el nivel de ganancia de la antena a  $\theta$  radianes desde el cruce de un sector a la dirección de ganancia máxima y  $p$  representa la ganancia promedio normalizada para el lóbulo lateral. Los valores para  $p$  y  $q$  son -15 dB y -4 dB respectivamente. Estos valores corresponden a una antena en un sector celular de 120° con un ancho de haz -3 dB [42] [43].

$$G(\phi_{k,i}) = \begin{cases} 1 - \frac{1-q}{\theta^2} \phi^2 & \text{si } |\phi_{k,i}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \\ p & \text{si } |\phi_{k,i}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \end{cases} \quad (5.4)$$

### 5.2.4 Métrica de calidad $E_b/I_0$

En un sistema OFDMA, la relación Señal a Interferencia está en función de la razón de la energía de bit a densidad espectral de interferencia definido en la siguiente Ecuación 5.5:

$$\gamma = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_i = \frac{W_0}{R_i} SIR_i \quad (5.5)$$

Donde:

$E_b$  es la energía de bit.

$I_0$  es la densidad espectral de interferencia.

$W_0$  es el ancho de banda del sistema celular.

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

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

### 5.2.5 Tasa de transmisión

La tasa de transmisión  $R_i$  se refiere a la cantidad de bits por segundo que pueden ser entregados por una estación base y es válida para los dos tipos de enlaces (*uplink* y *downlink*) y depende el tipo de modulación empleada.

Cuando la tasa de transmisión alcanza el valor máximo, se habla del parámetro llamado desempeño (Desempeño), es este el parámetro de interés para conocer la capacidad de un sistema OFDMA [6]. La definición correspondiente al desempeño del sistema queda expresada en términos de la tasa de transmisión en la Ecuación 5.6:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < m\gamma \\ mW_0 & \text{si } SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \quad (5.6)$$

Donde  $m$  toma un valor de acuerdo con el tipo de modulación empleado. Para Q-PSK,  $m = 2$ , para 16-QAM,  $m = 4$  y para 64-QAM,  $m = 6$ .

### 5.2.6 Tipos de modulaciones en OFDMA

En los sistemas celulares OFDMA se puede lograr una tasa de datos relativamente alta utilizando modulaciones como Q-PSK, 16-QAM, y 64-QAM, que mejoran la eficiencia espectral del sistema. Estas modulaciones envían 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  $m$  es un valor entero, que representa el número de bits requeridos para generar las  $M$  fases o amplitudes para las modulaciones Q-PSK o QAM respectivamente. [26]

#### *Modulación Q-PSK*

En esta modulación la fase de  $2\pi$  radianes es distribuida de manera uniforme entre las 4 señales de transmisión ( $M = 4$ ), la expresión para la señal transmitida está dada por la Ecuación 5.7:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} i\right) \quad (5.7)$$

Donde:

$E$  es la energía de la señal.

$T$  es la duración de cada símbolo.

$f_c$  es la frecuencia de la portadora.

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

Para este tipo de modulación sabemos que  $M = 4$  por lo tanto, por la definición de  $M = 2^m$  tenemos que  $m = 2$ .

### *Modulación 16-QAM y 64-QAM*

Esta modulación combina la ASK (modulación por desplazamiento de amplitud) ya modulación PSK (modulación por desplazamiento de fase) la señal está definida por la Ecuación 5.8:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} [a_i \cos(2\pi f_c t) - b_i \sen(2\pi f_c t)] \quad (5.8)$$

En estas modulaciones de acuerdo a lo anterior, para 16-QAM,  $M = 16$ , por lo tanto el valor de  $m = 4$ , mientras que para 64-QAM  $M = 64$  y  $m = 6$ . [26] [34].

### **5.2.7 Reutilización de frecuencias**

El sistema celular a evaluar está integrado por 3 capas de celdas interferentes o 37 celdas que permite medir con mayor precisión el nivel de afectación de la interferencia en la red. Por otra parte, la sectorización se utiliza para aumentar la capacidad del sistema en proporción al número de sectores considerados [44].

La reutilización de frecuencias ocurre cuando el sistema utiliza los mismos bloques de frecuencia más de una vez, cuando se hace uso de la reutilización, hay mejoras en la SIR del enlace. Un concepto importante en la reutilización de frecuencias es el término clúster para referirse 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 clúster corresponde al factor de reutilización en frecuencia (N). La asignación de los bloques de frecuencia se realiza tomando en cuenta la Ecuación 5.9:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (5.9)$$

Donde se debe cumplir que  $i \geq 1$  y  $j \geq 0$ ,  $i$  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. Puede ser descrita con la siguiente configuración:

$$N \times S \times K$$

Donde  $N$  es el número de celdas en un clúster,  $S$  es el número de sectores en la celda y  $K$  es el número de bloques de frecuencia en una celda. En la Figura 5.2 se muestra el número de celdas asignadas a un sistema celular con reutilización  $N = 19$ , donde  $i = 3$  y  $j = 2$  [6] [35].

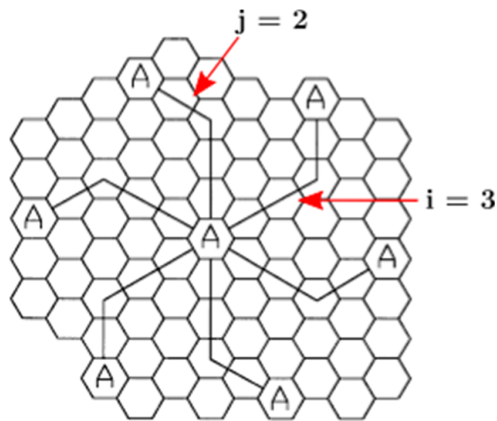


Figura 5.2: Asignación de las celdas para un factor de reutilización  $N=19$ .

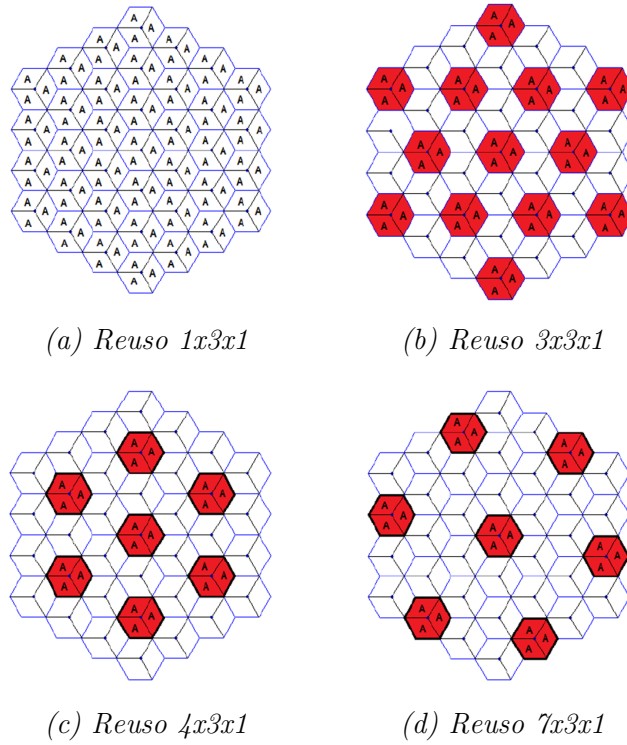


Figura 5.3: Reusos utilizados en las redes celulares OFDMA.

En la Figura 5.3 se muestran los tipos de reuso utilizados en este trabajo de tesis, nótese que la si bien el factor  $N$  cambia, las celdas que utilizan el mismo bloque de frecuencias se acercan o alejan. En función a esta distribución se puede evaluar el desempeño en los peores escenarios de la red, es decir, las configuraciones donde la interferencia entre las celdas es mayor.

# Capítulo 6

## Implementación

La simulación de sistemas es una importante herramienta utilizada para la caracterización y análisis de los procesos en diferentes disciplinas de la ingeniería. Esta estrategia permite hacer investigaciones con relativamente poco equipo y materiales, además brinda la oportunidad de alcanzar un alto nivel de comprensión acerca de los sistemas simulados.

Con respecto a los sistemas de comunicaciones, permanentemente se desarrollan nuevos entornos de simulación. En el contexto de las comunicaciones inalámbricas, la complejidad de las técnicas de acceso como CDMA, OFDMA, requiere de disponer de herramientas que simulen su comportamiento [41]. Algunos componentes se pueden simular utilizando el toolbox de comunicaciones de Matlab. Sin embargo, para considerar sistemas más complejos se requiere la programación de otras funciones adicionales.

Estas funciones adicionales permiten simular el proceso de banda base utilizando distintas técnicas de modulación, codificación de canal, multicanalización y acceso múltiple, integradas en un solo entorno de simulación si así se desea. Desde la interfaz de usuario se puede observar gráficamente como es el rendimiento de determinado sistema a través del modelado del mismo [38] [39] [40].

## 6.1 Modelo y desarrollo de la plataforma de evaluación del desempeño de la red OFDMA

La plataforma desarrollada está basada en el método de eventos discretos *Monte Carlo* con el fin de analizar el desempeño del enlace de bajada (downlink) del sistema OFDMA. Se decidió el enlace de bajada debido a que es el enlace crítico en el sistema de comunicación.

El primer paso para el desarrollo de esta plataforma es la generación de 37 celdas hexagonales divididos en 3 sectores de  $120^\circ$  cada uno, el radio de cada celda puede variar, pero para su evaluación en este trabajo, se considera de 1 Km. La evaluación toma como referencia a la celda central, en el cual en uno de sus tres sectores se crean  $n$  número de usuarios uniformemente distribuidos para la evaluación de la red en su forma convencional. Para la evaluación de la red con las estaciones base móviles se considera una densidad de usuarios diferentes por regiones dentro del sector. Para realizar el cálculo de las ganancias interferentes, se debe antes obtener el ángulo  $\phi$ , este ángulo se encuentra entre la dirección de máxima radiación de la antena ubicada en un sector de la celda y el usuario deseado. A continuación, se realizan las estimaciones para las pérdidas por propagación y los efectos por oscurecimientos o desvanecimientos lentos (*shadowing*) y desvanecimientos rápido (*fastfading*). Por último, se calcula la SIR del sistema para cada uno de los usuarios generados, la SIR nos permite conocer la tasa de transmisión del sistema en términos de *desempeño*.

En la Figura 6.1 se muestra el diagrama de flujo de lo descrito antes para sistemas OFDMA convencionales. La creación de los usuarios es de manera uniforme en todo el sector, mientras que la estación base de referencia se encuentra en el centro de su respectiva celda hexagonal.

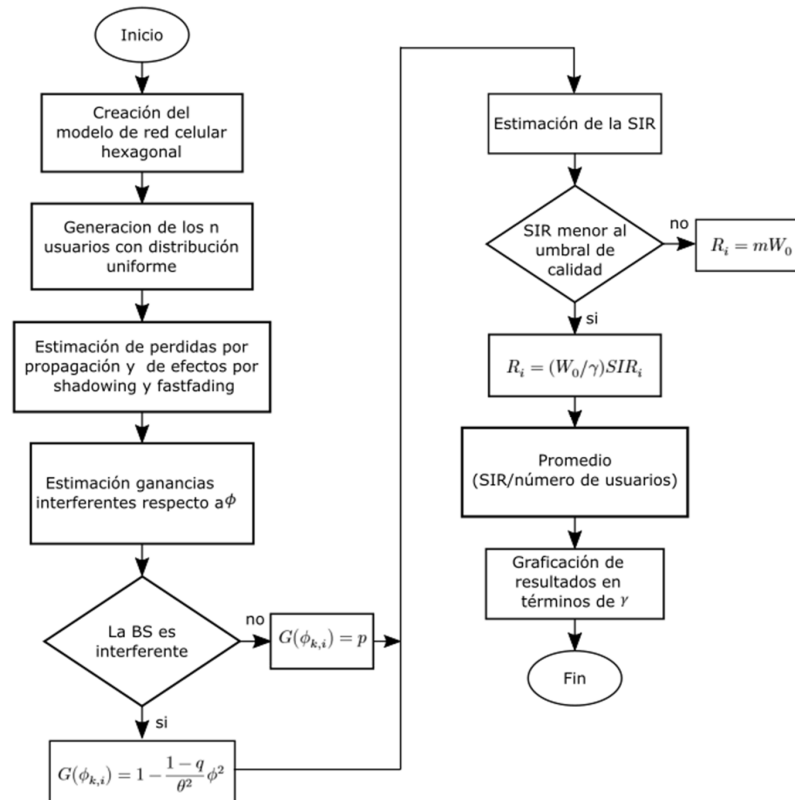


Figura 6.1: Diagrama de flujo de la simulación para sistemas OFDMA convencionales.

Para la evaluación del sistema con las estaciones base móviles, se considera que los usuarios no están distribuidos uniformemente dentro de cuatro posibles regiones ubicadas en función del punto a donde es desplazada la BS en 3 posiciones propuestas, mas su ubicación convencional. La Figura 6.2 muestra el diagrama de flujo que describe esta configuración.

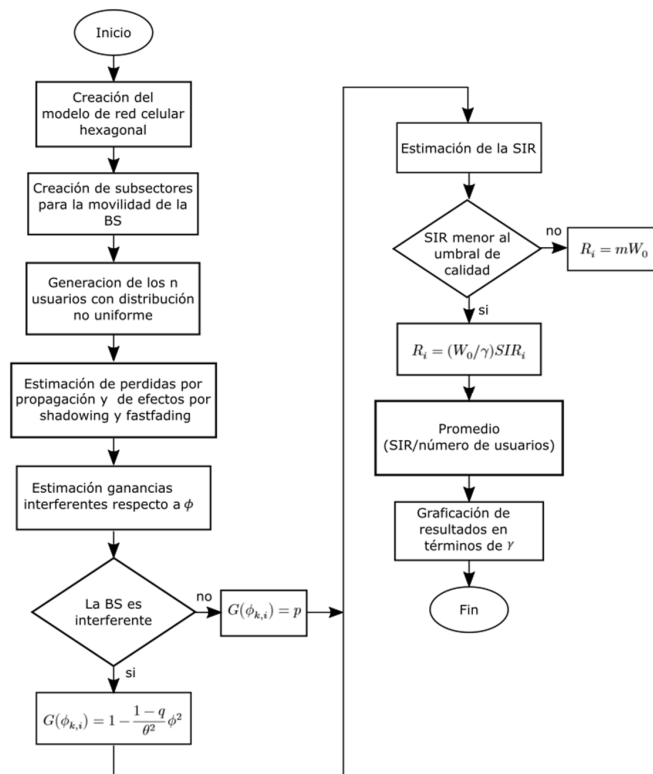


Figura 6.2: Diagrama de flujo de la simulación para la red OFDMA con BS móviles y usuarios no uniformes.

Como ya se ha descrito antes, el sistema modelado consiste en 37 celdas hexagonales, con una celda central de referencia para la evaluación. La Figura 6.3 (a) muestra la red celular. En el centro de cada una de las celdas se encuentra la estación base, en (b) se observa la sectorización de cada celda en áreas cada  $120^\circ$ , cada celda está conformada por 3 antenas sectorizadas. En uno de estos sectores se genera un número de usuarios, como ya se describió, la distribución de este usuario es uniforme, o no uniforme según sea la configuración de la red que se desea evaluar, la Figura 6.4 (a) ilustra la distribución uniforme de usuarios y en (b) se observa un ejemplo de distribución no uniforme de usuarios.

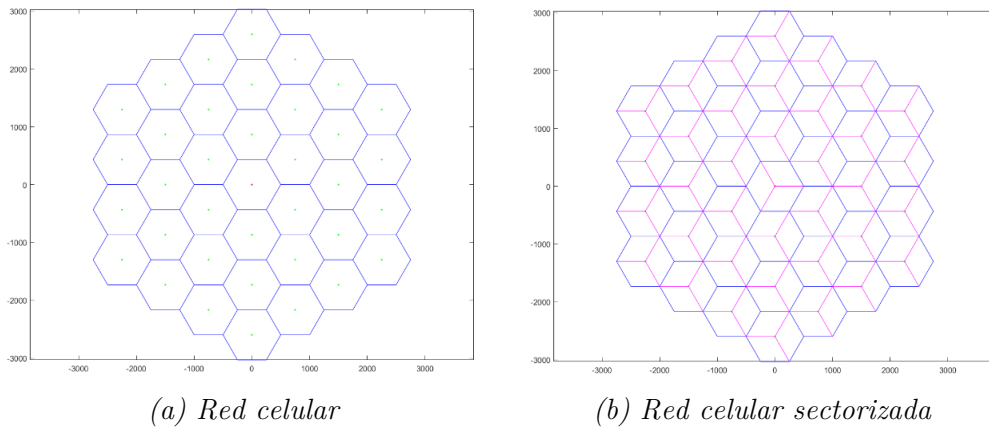


Figura 6.3: Creación del modelo de 37 celdas hexagonales.

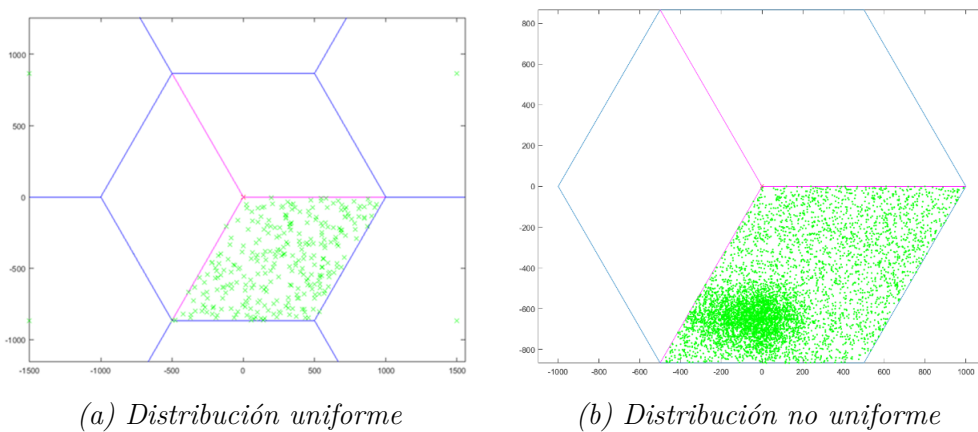
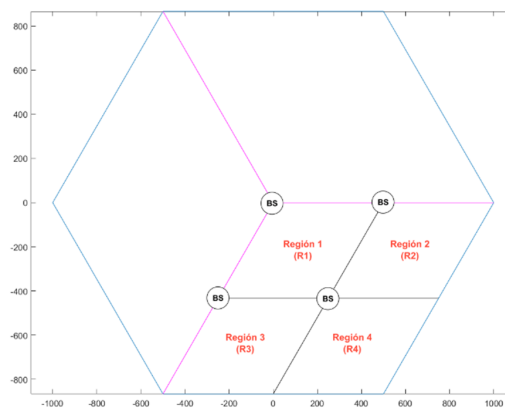


Figura 6.4: Tipos de distribuciones aplicadas en la evaluación del sistema OFDMA.

Para la distribución no uniforme, cada celda se divide en cuatro subregiones, la estación base se moverá a uno de los vértices de estas. Para la generación del tráfico o usuarios en estas subregiones se utiliza un parámetro que indicará donde existe sobrecarga dentro del área de cobertura denotado por  $P$ , que representa el porcentaje de usuarios que se concentra en una de las cuatro subregiones. El porcentaje complementario se distribuirá uniformemente en las 3 subregiones restantes.

Para este trabajo se consideran los escenarios en donde  $P = 0.2$ ,  $P = 0.4$  y  $P = 0.6$  que significa que el 20, 40 o 60% de los usuarios se encuentran distribuidos en la región de interés y el resto en el área complementaria. Estos porcentajes fueron elegidos considerando 3 escenarios diferentes en los que 2 de ellos no justifican la movilidad de la estación base y uno sí. Nótese que a mayor porcentaje de sobrecarga en alguna de las subregiones mayor será la justificación para mover la estación base. Sin embargo, esta decisión deberá estar ligada al incremento del desempeño en la red. En la Figura 6.5 se observa la nueva división generada para evaluar las diferentes densidades antes mencionadas, así como las posiciones asignadas para la estación base móvil respecto a estas regiones.



*Figura 6.5: Subregiones creadas para la evaluación de diferentes densidades  $P$  de usuarios generados en cada región.*

La Figura 6.6 muestra una región específica y como los usuarios son generados respecto al valor  $P$ . Para cada valor de  $P$  se evalúa el desempeño de la red con la estación base en su nueva ubicación respecto a R2 como se observa en la Figura 6.5, en (a) se muestra cuando  $P = 0$ , esto es prácticamente la generación de usuarios distribuidos uniformemente en toda el área del sector donde estos son generados.

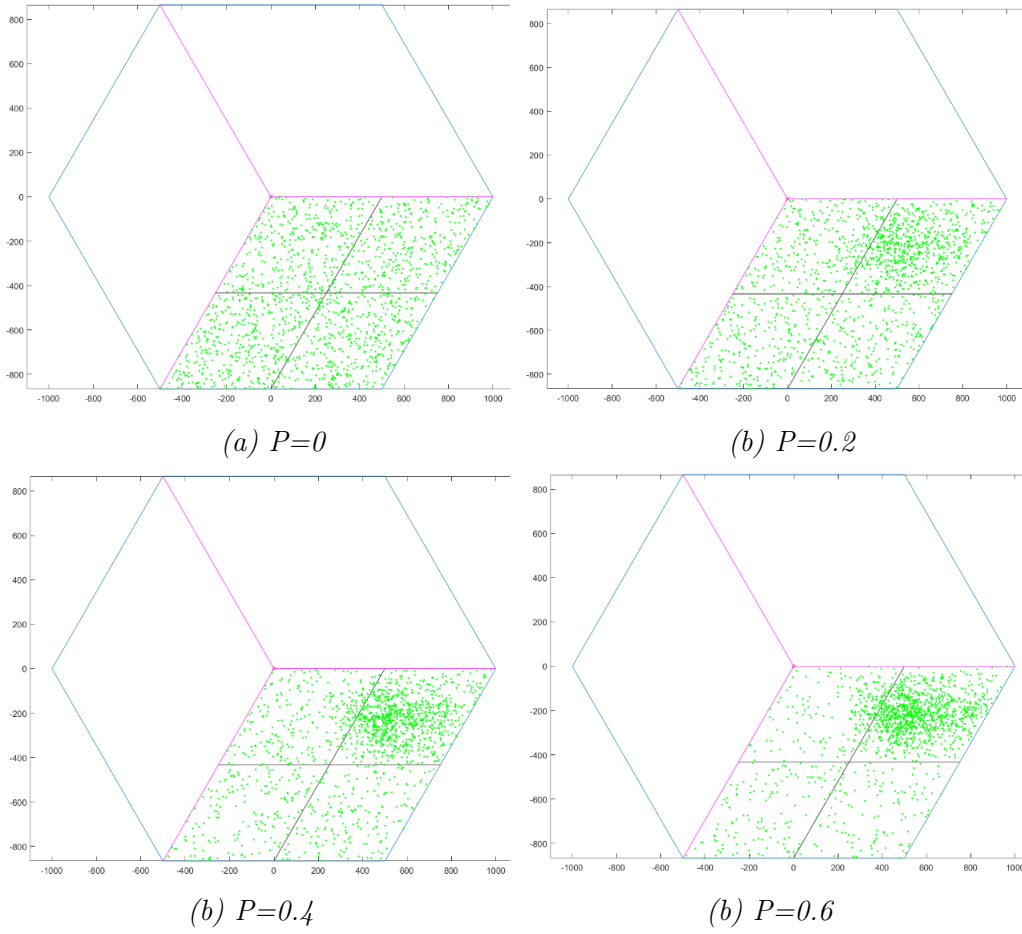


Figura 6.6: Diferentes densidades dadas para la región ( $R_2$ ).

Para simular la red celular, se implementan las Ecuaciones (5.2), (5.4), (5.5) y (5.6) en la plataforma de evaluación, estas ecuaciones son consideradas para cada evento generado, y posteriormente se visualizan los resultados obtenidos. Para la Ecuación (5.6), como se ha visto antes, el valor de  $m$  depende del tipo de modulación que se maneje. Es decir, para Q-PSK se tiene la siguiente Ecuación 6.1 donde  $m = 2$ :

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 2\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 2\gamma \end{cases} \quad (6.1)$$

Para 16-QAM,  $m = 4$ :

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 4\gamma \\ 4W_0 & \text{si } SIR_i \geq 4\gamma \end{cases} \quad (6.2)$$

Para 64-QAM,  $m = 6$ :

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 6\gamma \\ 6W_0 & \text{si } SIR_i \geq 6\gamma \end{cases} \quad (6.3)$$

## 6.2 Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de la evaluación del desempeño de la red celular OFDMA simulada, primero se muestra la evaluación del desempeño de la red celular con la estación base situada en la posición convencional considerando cada uno de los antes descritos.

Se comparará el desempeño de cada uno de los reusos de la red convencional con los resultados obtenidos de la evaluación de cada reuso para las subregiones creadas y su respectiva movilidad de la BS. Esto se hará con una distribución uniforme de usuarios para ambos casos. La Tabla 6.1 muestra los parámetros utilizados para la evaluación del desempeño del sistema en la plataforma desarrollada (Apéndice C).

*Tabla 6.1: Parámetros de la red OFDMA implementada.*

Parámetros	Valores
Radio de la celda	1 Km
$W_0$	10 MHz
$\theta$	120°
$p$	-15 dB
$q$	-4 dB
media	0
$\sigma$	8
$u$	4
$\gamma$	1, 2, 3, 4, 5, 6

### 6.2.1 Evaluación del desempeño de la red con usuarios generados uniformemente y la BS desplazada.

Para establecer que los datos obtenidos en la simulación de la evaluación del sistema implementado son correctos y confiables, es necesario comparar con los resultados reportados por otros autores y la norma IEEE 802.16. La gráfica de la Figura 6.7 muestra que nuestro modelado y evaluación del desempeño de la red, es en efecto, confiable de acuerdo con [36], [42] y [43]. Para evaluar la red, se eligió el reuso 1x3x1 por ser el peor escenario de operación de la red OFDMA, en este reuso todas las celdas y sus respectivos sectores usan la misma frecuencia, lo que lleva a un aumento de la interferencia respecto a otras combinaciones (Apéndice B).

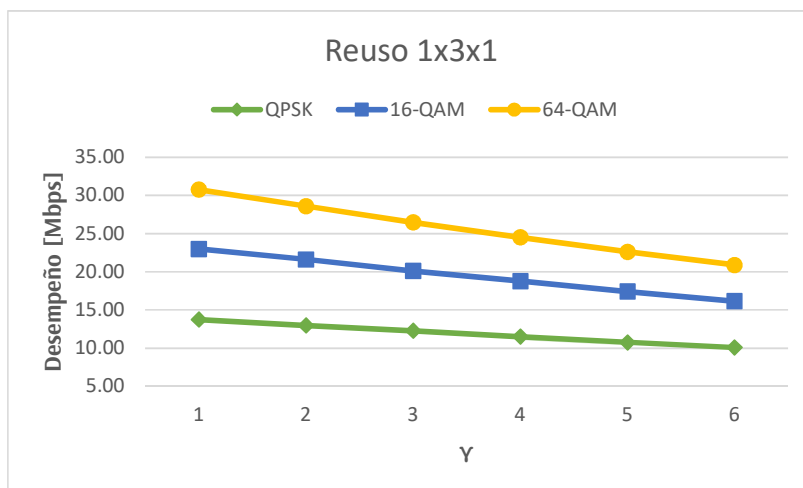


Figura 6.7: Desempeño de la red OFDMA convencional y la red con BS móvil para R1 con usuarios distribuidos uniformemente.

La Figura 6.7 muestra el desempeño de la red OFDMA en su forma convencional y en la región R1 con reuso 1x3x1, ambos modelos muestran el mismo comportamiento debido a que para R1, la estación base no sufre de cambio de posición como se ve en la Figura 6.5. Lo que tiene como consecuencia que los valores de desempeño de ambos modelos sea el mismo para las tres modulsiones evaluadas con variaciones de ganancia mínima de aproximadamente 4% y máximas del 16% para la modulación 16-QAM. Estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura [42] [43] y la norma IEEE 802.16.

En la Figura 6.8 se observa el desempeño para la región R2, se aprecia que la red sufre una pequeña mejora del desempeño cuando la estación base es desplazada.

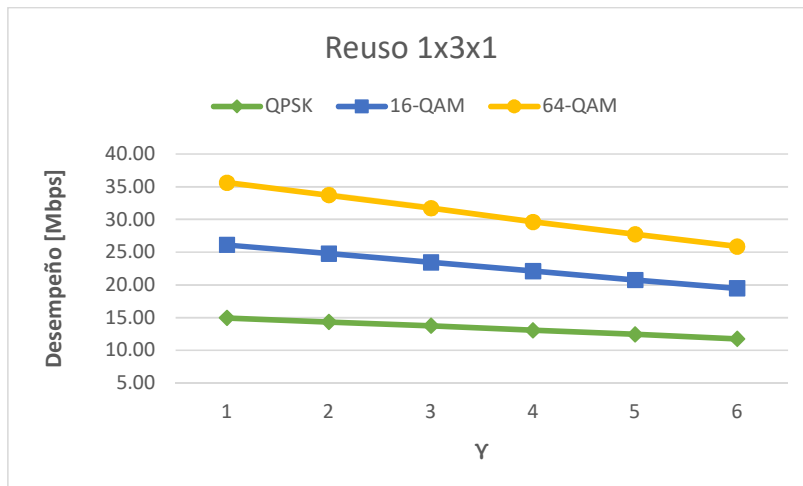


Figura 6.8: Desempeño de la red OFDMA móvil para R2 con usuarios uniformemente distribuidos.

Debido a la simetría de la red, se observa que el desempeño de la región R3 (Figura 6.9), presenta el mismo comportamiento que el desempeño para R2. De tal forma que los resultados de desempeño respecto a la red convencional incrementaron para R2 (12.61% para Q-PSK, 16.76% para 16-QAM y 19.81% para 64-QAM) y R3 (16.61% en Q-PSK, 16.86% para 16-QAM y 19.96% para 64-QAM) son prácticamente los mismos, por lo tanto, el desempeño de estas dos regiones es similar. R3 también sufre una mejora mínima con respecto al desempeño de la red convencional tal y como ocurre con la subregión R2.

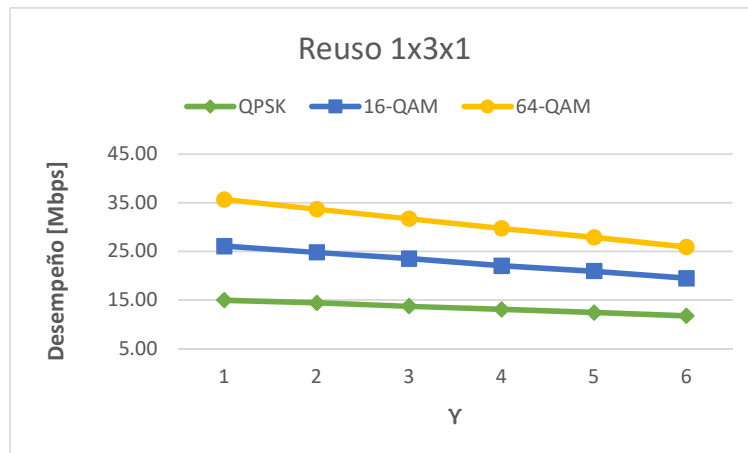


Figura 6.9: Desempeño de la red OFDMA móvil para  $R_3$  con usuarios uniformemente distribuidos.

En la subregión  $R_4$  los valores de desempeño son considerablemente mayores que cualquiera de las subregiones anteriores y la red convencional para las modulaciones 16-QAM y 64-QAM con 68.06% y 62.32% respectivamente de incremento respecto a los valores de la red convencional como se observa en la Figura 6.10, en el caso de la modulación Q-PSK, no existe un cambio significativo de su tasa de transmisión en cualquiera de las figuras de desempeño de la red, siendo el más alto 12% de ganancia en  $R_2$ .

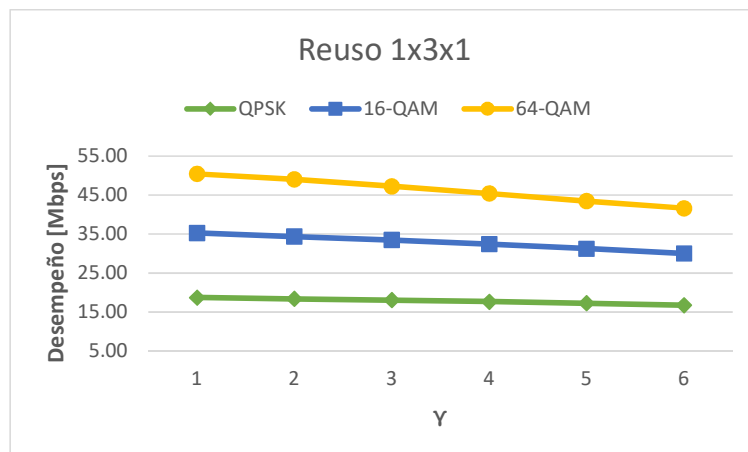


Figura 6.10: Desempeño de la red OFDMA móvil para  $R_4$  con usuarios uniformemente distribuidos.

La Tabla 6.2 resume todas estas características deducidas a partir de la evaluación de las diferentes propuestas, estimando la ganancia obtenida para cada subregión tomando como punto de evaluación la red convencional con reuso 1x3x1.

*Tabla 6.2: Ganancias del sistema móvil en comparación al desempeño de la red convencional con reuso 1x3x1.*

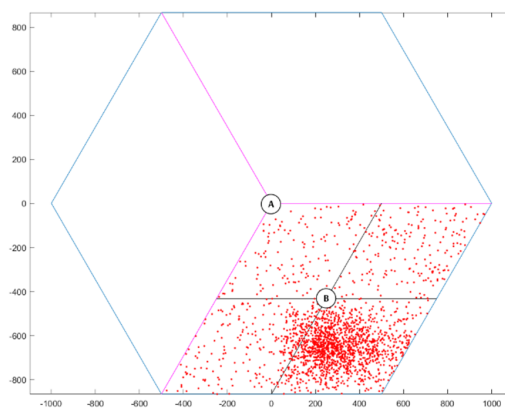
Tipo de evaluación	Modulación	Desempeño [Mbps]			Incremento (%)
		Val. Máx.	Val. Min.	Promedio	
Convencional	Q-PSK	13.74	10.09	11.89	-
	16-QAM	22.99	16.15	19.51	-
	64-QAM	30.77	20.88	25.64	-
Móvil R1	Q-PSK	14.37	10.49	12.44	4.62
	16-QAM	24.05	16.58	22.78	16.76
	64-QAM	32.03	21.67	26.68	4.05
Móvil R2	Q-PSK	14.96	11.74	13.39	12.61
	16-QAM	26.10	24.79	22.78	16.76
	64-QAM	35.62	25.86	30.72	19.81
Móvil R3	Q-PSK	14.99	11.75	13.39	12.61
	16-QAM	26.08	19.46	22.80	16.86
	64-QAM	35.64	25.91	30.76	19.96
Móvil R4	Q-PSK	18.67	16.70	17.76	49.36
	16-QAM	35.26	30	32.79	68.06
	64-QAM	50.46	43.49	41.62	62.32

## 6.2.2 Evaluación del desempeño de la red con incremento de tráfico en las subregiones y la BS desplazada.

Para obtener la evaluación del sistema bajo estas condiciones, se opta por analizar el desempeño de la red con la modulación Q-PSK, debido a que como se observa en las Figuras anteriores es el peor escenario de desempeño.

En general, tenemos que el reuso  $1 \times 3 \times 1$  y la modulación Q-PSK representan el caso límite de evaluación del desempeño. En esta evaluación se considera no solo la movilidad de la BS, también se considera cuando la densidad de los usuarios es diferente para cada subregión. Para cada evento de las subregiones con diferentes densidades ( $P = 0.2, 0.4, 0.6$ ), se evaluara la red convencional para las distintas densidades en cada subregión, a continuación se describe en detalle cada caso.

Para entender mejor la forma de evaluación, en la Figura 6.11 se tiene una representación gráfica, se toma como ejemplo la evaluación de la subregión R4, con una  $P = 0.6$ . El primer paso es evaluar esta distribución con la red convencional, entonces la estación base se encuentra en el punto A y se evalúa el desempeño del sistema con la configuración descrita. Lo siguiente es evaluar el desempeño de la red con la estación base móvil para la subregión R4, entonces la estación base se coloca en el punto B y se realiza la evaluación correspondiente. Así cada una de las subregiones, con distintas distribuciones, han sido evaluadas respecto a la red convencional y con estaciones bases móviles.



*Figura 6.11: Demostración de la evaluación del desempeño para cada subregión con usuarios sin distribución uniforme.*

En la Figura 6.12 se muestra el desempeño tanto para la red convencional como para la red sectorizada en la subregión R1 con la estación base móvil, en este caso la BS no cambia de posición, lo que significa que ambos sistemas evaluados se comportan de la misma forma, la ganancia de desempeño es prácticamente nula.

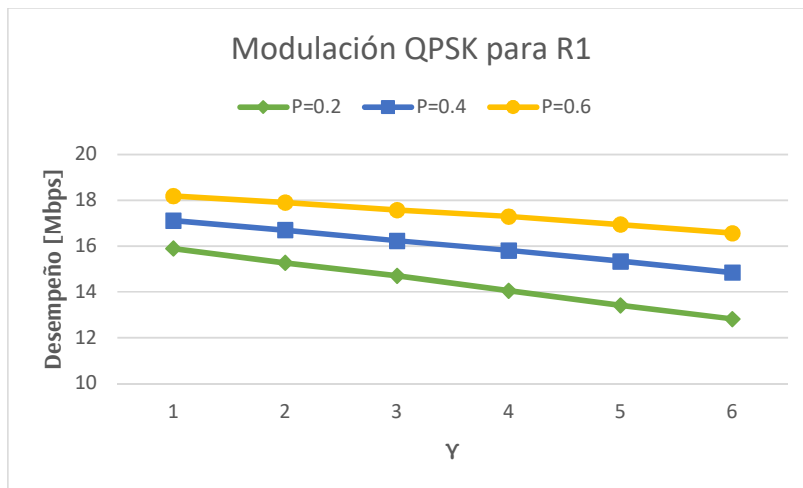


Figura 6.12: Desempeño de la red OFDMA convencional y la red con BS móvil para R1 con usuarios sin distribución uniforme.

El desempeño de la red convencional para distintas cargas de usuarios en R2 se ilustra en la Figura 6.13. Al comparar estos resultados con los valores de la evaluación en la red móvil con la estación base en R2 de la Figura 6.14, existe una ganancia considerable para cada densidad  $P$  como que se describe en la Tabla 6.3. Donde el mayor incremento en el rendimiento se tiene para  $P = 0.4$  con 54.19% de incremento.

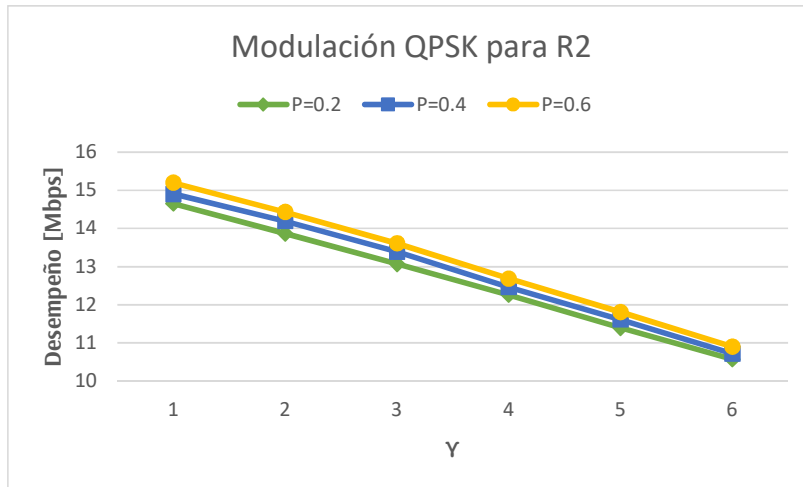


Figura 6.13: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R2.

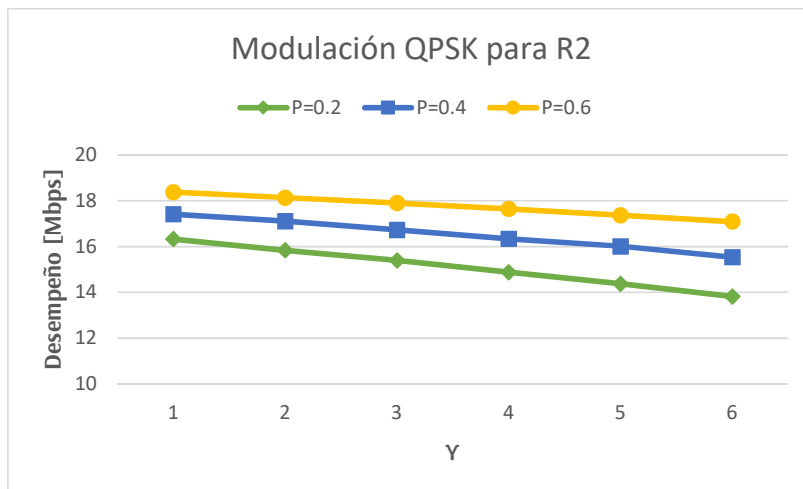


Figura 6.14: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R2 y usuarios sin distribución uniforme.

Tabla 6.3: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes  $P$  en  $R2$  para los dos tipos de evaluación de la red.

Tipo de evaluación	Probabilidad $P$	Desempeño [Mbps]			Incremento (%)
		Val. Máx.	Val. Min.	Promedio	
Convencional	0.2	13.87	10.58	12.64	-
	0.4	14.19	13.39	10.72	-
	0.6	14.43	13.61	12.68	-
Móvil R2	0.2	16.33	13.82	15.11	19.54
	0.4	17.42	15.54	16.53	54.19
	0.6	18.38	17.10	17.75	39.98

La evaluación para la subregión R3 se muestra en la Figura 6.15. En comparación con los valores para la misma subregión de la Figura 6.16 se obtiene la Tabla 6.4, que ilustra el incremento para cada densidad. Este tiene su mayor incremento del 50% cuando  $P = 0.6$ .

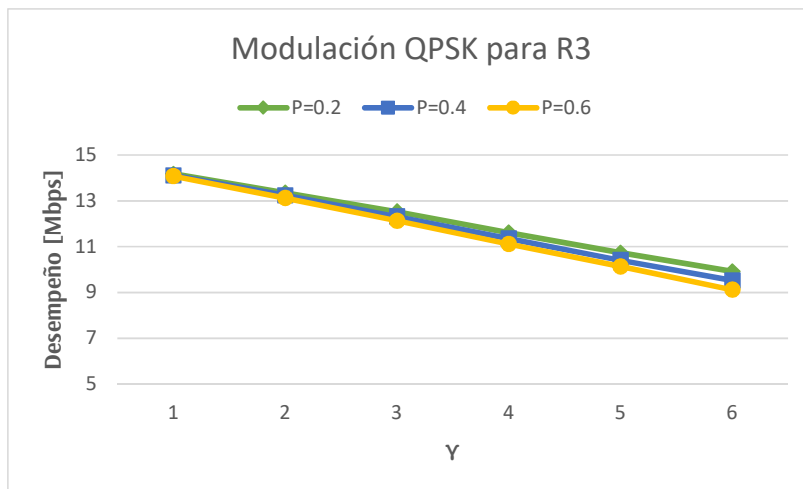


Figura 6.15: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R3.

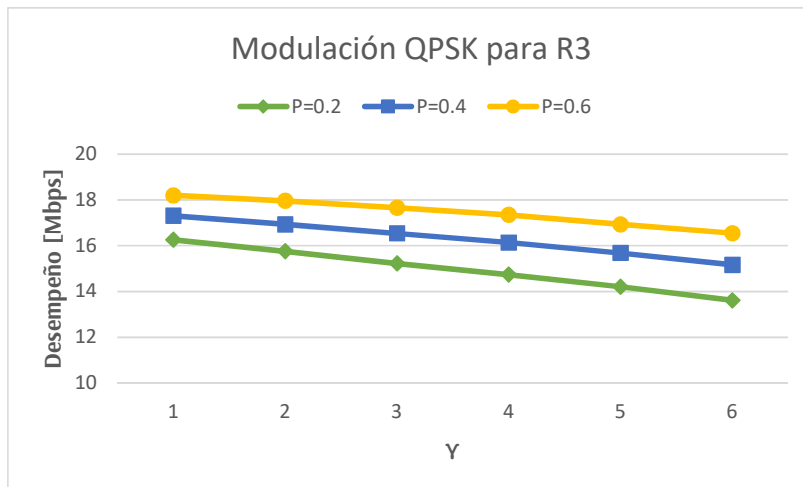


Figura 6.16: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R3 y usuarios sin distribución uniforme.

Tabla 6.4: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes  $P$  en R3 para los dos tipos de evaluación de la red.

Tipo de evaluación	Probabilidad $P$	Desempeño [Mbps]			Incremento (%)
		Val. Máx.	Val. Min.	Promedio	
Convencional	0.2	13.35	9.92	12.06	-
	0.4	13.24	12.32	11.36	-
	0.6	13.12	9.12	11.62	-
Móvil R3	0.2	16.26	13.62	14.97	24.12
	0.4	17.31	15.17	16.29	43.39
	0.6	18.20	16.55	17.44	50

Por último, se realiza la evaluación de la última subregión R4. En la Figura 6.17 se observan los resultados cuando la distribución de los usuarios presenta distintas densidades en la red convencional. La evaluación de la red móvil ilustrados en la Figura 6.18, dan mejores resultados de desempeño en términos de la tasa de transmisión con un valor de 57.03% de incremento en el desempeño cuando  $P = 0.2$  y alcanzando su máximo porcentaje de mejora en el desempeño cuando  $P = 0.6$  con un incremento de 80.01% del desempeño.

La Tabla 6.5 ilustra la comparación y los porcentajes de mejora para los dos casos evaluados en la subregión R4.

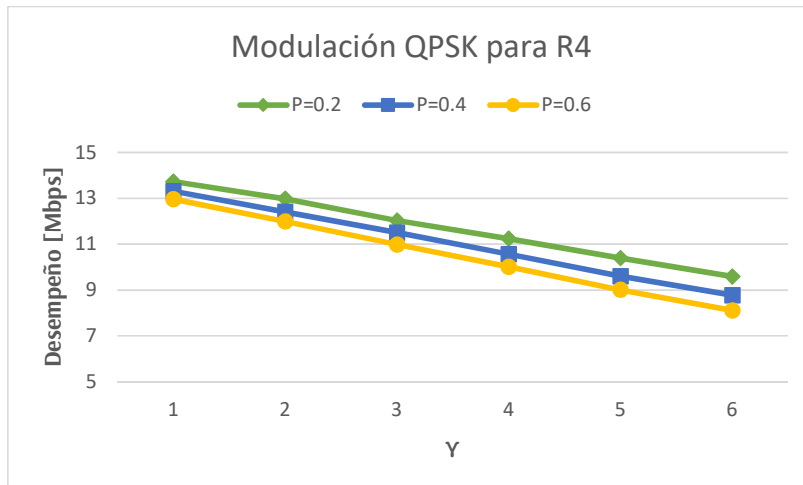


Figura 6.17: Desempeño de la red OFDMA convencional con usuarios no uniformes distribuidos sobre R4.

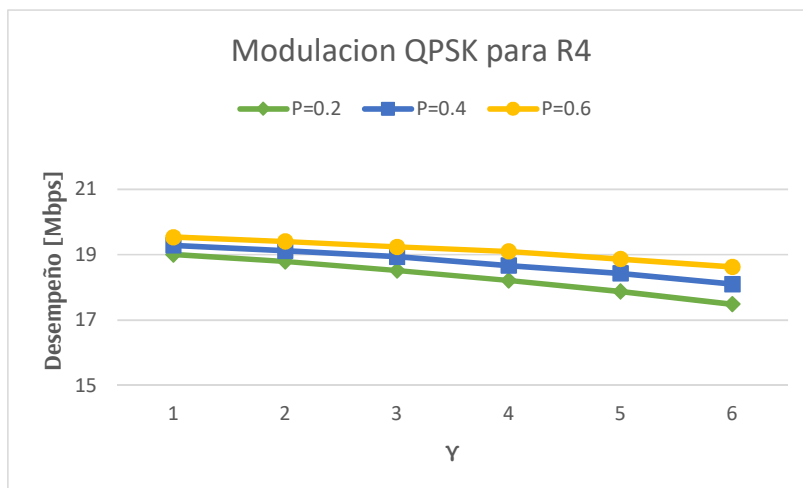


Figura 6.18: Desempeño de la red OFDMA móvil con BS en R4 y usuarios sin distribución uniforme.

*Tabla 6.5: Comparación de los valores de desempeño obtenidos para diferentes  $P$  en  $R4$  para los dos tipos de evaluación de la red.*

Tipo de evaluación	Probabilidad P	Desempeño [Mbps]			Incremento (%)
		Val. Máx.	Val. Min.	Promedio	
Convencional	0.2	13.73	9.59	11.66	-
	0.4	13.31	8.11	11.03	-
	0.6	12.96	8.11	10.51	-
Móvil R4	0.2	19	17.49	18.31	57.03
	0.4	19.28	18.10	18.76	70.08
	0.6	19.53	18.63	19.13	82.01

## 6.3 Conclusiones

Con la simulación se puede concluir que, para los distintos casos y eventos evaluados, la mejora de la red con movilidad se presenta cuando la estación base se encuentra en la subregión cuatro, debido a que en este punto la BS se encuentra a una distancia lejana de las regiones interferentes respecto a las otras BSs, disminuyendo considerablemente la interferencia que existe.

En términos generales, el movimiento de la BS supone una mejora en el desempeño de la tasa de transmisión de la red, en especial cuando la carga de usuarios se encuentra en regiones alejadas de la BS convencional. El desempeño de la red depende también del reuso y la modulación que utilicen. Algunos de los puntos que deberían ser tomados en cuenta para considerar la movilidad de la estación base son:

**El sector a donde se desplace la BS.** Incluso cuando hay una mejora en el desempeño de la red en las subregiones R2 y R3 en los casos evaluados, esta es muy pequeña en comparación con la mejora reportada en la subregión R4. Mitigar la degradación del servicio podría ser más económico empleando Radio Definido por Software (SDR) que desplazando completamente una estación base aérea (AeNB) a la subregión.

**El tipo de modulación:** Se ha dicho que el desempeño de la red depende en gran parte de su reuso y de la modulación que utilice, pero de acuerdo a los resultados mostrados en el trabajo de tesis, sin importar la modulación para el reuso 1x3x1, la implementación de 16-QAM y 64-QAM mejora su desempeño significativamente a diferencia de la modulación Q-PSK que se mantiene constante en un rango de valores mínimos del desempeño de la red.

En lo que respecta al despliegue de una red completamente paralela a la red convencional cuando esta es destruida o dañada se deben considerar no solo las modulaciones o las subregiones con más carga de usuarios, tal es el ejemplo de un evento masivo. Por ejemplo, en la plataforma que conformara la estación base aérea (AeNB), el peso útil de carga que repercute en la elección del tipo de antena a usar y su potencia. que está ligado al rango de cobertura que puede satisfacer, y la interoperabilidad con otras redes.

Existen un numero de variables o parámetros que deben ser consideradas si se planea modelar la red con BS móviles con una mayor precisión. Algunos de estos parámetros que son dependientes del tiempo no se consideran en esta evaluación al ser eventos discretos, pero en un trabajo futuro todos los parámetros descritos, tal como la potencia de la antena, su peso, la batería del VANT si se trabaja con drones, el peso útil de carga, los efectos de altura de la estación base aérea (AeNB), el movimiento de más BS que conforman una red celular y su interoperabilidad pueden ser incorporadas para obtener una evaluación que se apegue más a la realidad física del sistema, lo que elevaría la complejidad de la simulación.

Las tendencias futuras para las redes de quinta generación están basadas no solo en la interoperabilidad de distintos estándares de redes inalámbricas de datos, si no de tecnologías y elementos con características que aportan una mejora única a los nuevos sistemas. Una de esas mejoras peculiares la aportan los sistemas que consideran la interoperabilidad entre redes convencionales y redes de movilidad como lo es ABSOLUTE, que hacen converger estándares y arquitecturas en una sola red de redes.

---

## Bibliografía

- [1] T. S. Rappaport, A. Annamalai, et. al., “Wireless communications: Past events and Future Perspective”, *IEEE Commun. Magazine*, 50th Anniversary Commemorative Issue, pp. 148-161, Mayo 2002.
- [2] N. Heuveltop (2017, Q3). Ericsson Mobility Report [Online]. Available: [www.ericsson.com/mobility-report](http://www.ericsson.com/mobility-report).
- [3] T. S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., 2a Ed., 2002.
- [4] Gina Sierra, “Estudio del Modelo de Propagación Suzuki para Redes Móviles”, *Revista Electrónica Redes de Ingeniería*, ISSN 2248-762X, Vol.4,2, pp. 28-34, Diciembre 2013.
- [5] Ashutosh Dhekne, Mahanth Gowda y Romit Roy Choudhury, “Poster: Cell Tower Extension Through Drones”, *Mobicom: International Conference on Mobile Computing & Networking*, ISBN 978-1-4503-4226-1/16/10, pp. 456-457, Enero 2016.
- [6] C. Yang Samuel, *OFDMA System Analysis and Design*, Ed. Artech House, Ltd, USA, 2010.
- [7] K. Namuduri, "Flying cell towers to the rescue", *IEEE Spectrum*, vol. 54, no. 9, pp. 38-43, September 2017.
- [8] D. Muñoz Rodríguez, *Sistemas inalámbricos de comunicación personal*, Ed. Marcombo, 2002.
- [9] O. Rodríguez Gamez, R. Hernández Perdomo, “Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas”, *Red Revistas Científicas de LATAM*, vol. 11, no. 1, pp. 1-8, Enero-Marzo 2005.
- [10] J.M Huidobro, “Antenas de telecomunicaciones”, *Revista Digital de ACTA*, 2013.
- [11] A. Cardama, L. Jofre, J.M. Rius, J. Romeu, S. Blanch, M. Ferrando, *Antenas*, Ed. Universitat Politecnica de Catalunya, 2004.

- 
- [12] L. Stutzman, *Antena theory and design*, ISBN: 978-0-470-57664, E.U.A, 2013.
- [13] G. Singh, N. Bansal, P. Rani, “4G Mobile Network Technology (LTE)”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vo. 7, no. 6, Noviembre 2016.
- [14] U. Varshney, “4G Wireless Networks”, *IEEE Computer Society*, Septiembre- Octubre 2012.
- [15] M. Javed, J.T. Siddiqui, “Transformation of Mobile Communication Network from 1G to 4G and 5G”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no. 3, Marzo-Abril 2017.
- [16] S. Allsopp, “Emergency Airborne 4G Comms to Aid Disaster Traffic Management”, in *Road Transport Information and Control (RTIC)*, Londres, UK, 2014.
- [17] K. Gomez, S. Kandeepan, M. Vidal, V. Boussmart, “Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Next Generation Emergency Communications”, *IEEE Communications Magazine*, Abril 2016.
- [18] Bloomberg Bussinessweek (2013), A Cell Tower for Every Smartphone [Online]. Available: [www.bloomberg.com/businessweek](http://www.bloomberg.com/businessweek).
- [19] T. Simonite, A Cell-Phone Tower for Your Pocket (Febrero, 2011) [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/s/422654/a-cell-phone-tower-for-your-pocket>.
- [20] Telecom ABC, Private Mobile Radio (PMR) (2005) [Online]. Available: <http://www.telecomabc.com/p/pmr.html>.
- [21] L. Goratti, K. Gomez, T. Rasheed, S. Reisenfeld, “Connectivity Study in Professional Mobile Radio Networks with Portable 4G Base Stations”, in *27th Anual International Symposium on PIMRC: MAC & Cross-Layer Design*, 2016.
- [22] Department of Electronic Engineering, University of York, FP7 Aerial Base Stations with Opportunistic Links For Unexpected & Temporary Events [Online]. Available: [www.york.ac.uk/electronic-engineering/research/communication-technologies/projects/fp7-absolute](http://www.york.ac.uk/electronic-engineering/research/communication-technologies/projects/fp7-absolute).

- 
- [23] T. Ali-Yahija, *Understanding LTE and its Performance*, Francia, Springer, 2011.
- [24] 3GPP (2018), Technologies Home [Online], Available: <http://www.3gpp.org/technologies/technologies>.
- [25] La norma IEEE 802.16 [Online], Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11435/fichero/Documentaci%C3%B3n+%252F07+-+Capitulo+3+-+La+Norma+IEEE+802.pdf>
- [26] R. Prasad, F.J. Velez, *WiMax Networks Techno-Economic Vision and Challenges*, Springer, 2010.
- [27] UNAM, Capitulo 4: Estándar IEEE.802.16 (WiMax) [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/164/A7.pdf?sequence=7>.
- [28] El estándar IEEE std 802.16™ [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11539/fichero/Volumen1%252FCapitulo1.pdf>
- [29] Prime Performance Technologies, Wireless Point-to-Multipoint Links (PMP) & WiMax [Online]. Available: <http://www.pptinc.net/pmp.html>
- [30] A. Bestetti, G. Giambene, S. Hadzic, “WiMAX: MAC Layer Performance Assessments”, *framework of the EU FP6 WEIRD Project*, 2008.
- [31] N. Dutta, S.R. Biradar, “Interoperability of WiFi and WiMAX”, in 2nd IEEE International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing, 2012.
- [32] G. Parsace, A. Yarali, “Ofdma For The 4th Generation Cellular Networks”, *CCECE*, Niagara Falls, Mayo 2004.
- [33] D. Tuñón, R. Ortega, “OFDMA para Sistemas de Banda Ancha Inalambrica”, *Tecnología a Fondo*, pp. 32-25, Septiembre 2009.
- [34] J.G. Proakis, *Introduction to analog and digital communications*, Ed. Mc. Grow-Hill, 2008.
- [35] F.J. Velez, L.M. Correia, J.M. Brázio, “Frequency reuse and system capacity in Mobile Broadband Systems: comparison between the 40 and 60 GHz bands”, *Wireless Pers. Commun.*, Agosto 2001.

- 
- [36] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, "IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", Revision of IEEE Std 802.16-2009, 2012.
- [37] M. Wang, "WiMAX Physical Layer: Specifications Overview and Performance Evaluation", *2nd IEEE CCNC Research Student Workshop*, 2011.
- [38] G. Tsirakakis, T. Clarkson, "Simulations tools for multilayer fault restoration". *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, no. 3, pp. 128-134, Marzo 2009.
- [39] Y. Gao, X. Zhang, Y. Dachengand, Y. Jiang, "Unified simulation evaluation for mobile broadband technologies". *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, no. 3, pp. 142-149. Marzo 2009
- [40] W. Kasch, J. Ward, J. Andrusenko, "Wireless network modeling and simulation tool for designers and developers". *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, no. 3, pp. 120-127. Marzo 2009
- [41] P. A. Barbancho, M. J. Entrambasaguas, "Simulador CDMA para comunicaciones móviles". Trabajo de Grado de Ingeniería. Universidad de Málaga. Ingeniería de Telecomunicaciones. España. 2000.
- [42] J. Castañeda-Camacho et al. "Montecarlo Simulation Applied to Measurement of the Impact of the Smart Antenna Technology in Digital Cellular Systems / Simulación Montecarlo Aplicada a La Medición Del Impacto De La Tecnología De Antenas Inteligentes en Sistemas Celulares Digitales.", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, no. 2, p. 207, 2015.
- [43] O. Guerrero-Mendez, J. Castañeda-Camacho et al. "Performance Evaluation of and OFDMA and CDMA overlaid system", in *IEEE MTT-S Latin American Microwave Conference (LAMC)*, Diciembre 2016.
- [44] J. Castañeda-Camacho, C. E. Uc-Rios, D. Lara-Rodríguez, "Reverse Link Capacity of Multiclass CDMA Cellular System Considering Noideal Antenna Sectorization", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 52, no. 6.

# Apéndice A

## Código en Matlab

```

%% Creación de celdas
n = 6;
radio = 1000;
L = 0:(2*pi)/n:2*pi;
xv = radio*cos(L);
yv = radio*sin(L);
alpha = 360/n;
apotema = radio/(2*tand(alpha/2));

.....

%% Definición de parámetros
p = db2pow(-15);
q = db2pow(-4);
tetha = (120*pi)/180;
sigma = db2pow(8);
media = 0;
u = 4;
wc = 10000000;
gamma = db2pow([1 2 3 4 5 6]);

% Delimitación para la creación de los usuarios en un sector
xvrombo = [radio 0 -(radio/2) (radio/2) radio];
yvrombo = [0 0 -(apotema) -(apotema) 0];

.....

%% Inicio de cálculos
for indice=1:6
t = 1;
while (t<=100)
    vmx = -(radio/2)+(radio+(radio/2)).*rand(1,numusuario);
    vmy = 0+(-apotema+0).*rand(1,numusuario);
    in = inpolygon(vmx,vmy,xvrombo,yvrombo);

    if( isempty(vmx(~in)) == 1 && isempty(vmy(~in)) == 1 && (vmx-
x0)^2+(vmy-y0)^2 >= R^2)

        axt(t) = vmx;
        ayt(t) = vmy;
        distancias = zeros(1,37);
        distancias(1) = sqrt(((vmx-x0)^2)+((vmy-y0)^2));
        for n = 1:length(posicion)
            distancias(n+1) = sqrt(((vmx-posicion(n,1))^2)+((vmy-
posicion(n,2))^2));

```

```
end
```

```
.....
% Calculo de las distancias de cada usuario
```

```
n = 1;
```

```
for i=1:3:(length(distancias)-1)*3
```

```
    px1 = posicion(n,1)+ (radio/2);
```

```
    py1 = posicion(n,2)+apotema;
```

```
    px2 = posicion(n,1)+ (radio/2);
```

```
    py2 = posicion(n,2)-apotema;
```

```
    px3 = posicion(n,1)-radio;
```

```
    py3 = posicion(n,2);
```

```
.....
% Calculo de los ángulos  $\phi$ 
```

```
    d1 = distancias(1+n);
```

```
% Distancias para obtener phi1
```

```
    d2 = sqrt(((px1-posicion(n,1))^2)+((py1-posicion(n,2))^2) );
```

```
    d3 = sqrt(((px1-vmx)^2)+((py1-vmy)^2) );
```

```
    phi(i) = acos(((d3^2)-(d2^2)-(d1^2))/(-2*d1*d2) );
```

```
% Distancias para obtener phi2
```

```
    d22 = sqrt(((px2-posicion(n,1))^2)+((py2-posicion(n,2))^2) );
```

```
    d32 = sqrt(((px2-vmx)^2)+((py2-vmy)^2) );
```

```
    phi(i+1) = acos(((d32^2)-(d22^2)-(d1^2))/(-2*d1*d22) );
```

```
% Distancias para obtener phi3
```

```
    d23 = sqrt(((px3-posicion(n,1))^2)+((py3-posicion(n,2))^2) );
```

```
    d33 = sqrt(((px3-vmx)^2)+((py3-vmy)^2) );
```

```
    phi(i+2) = acos(((d33^2)-(d23^2)-(d1^2))/(-2*d1*d23) );
```

```
    n = n+1;
```

```
end
```

```
.....
% Calculo de las ganancias interferentes
```

```
for i = 1:length(phi)
```

```
    if (phi(i) <= sqrt((1-p)/(1-q))*(tetha/2) )
```

```
        gk(i) = 1-(((1-q)/((tetha/2)^2))*phi(i)^2);
```

```
elseif (phi(i) > (sqrt((1-p)/(1-q))*(tetha/2)) )
```

```
    gk(i) = p;
```

```
    end
```

```
end
```

```

%% Creacion de las variables aleatorias log normal y Raleigh
va = media + sigma*randn(1,111);
g = 10.^(va/10);

vr = raylrnd(10,1,111);

n = 1;
for i = 2:length(distancias)
    for j = 1:3
        den(n) = (gk(n)*vr(n))/((distancias(i)^u)*g(n));
        n = n+1;
    end
end

.....

%% Calculo de la ganancia del usuario a la estación base

d01 = distancias(1);

d02 = sqrt((((radio/2)-x0)^2)+((-apotema-y0)^2) );
d03 = sqrt((((radio/2)-vmx)^2)+((-apotema-vmy)^2) );

dc2 = sqrt((((radio/2)-x0)^2)+((apotema-y0)^2) );
dc3 = sqrt((((radio/2)-vmx)^2)+((apotema-vmy)^2) );

dcc2 = sqrt((((radio)-x0)^2)+((0-y0)^2) );
dcc3 = sqrt((((radio)-vmx)^2)+((0-vmy)^2) );

phic(1) = acos( ((d03^2)-(d02^2)-(d01^2))/(-2*d01*d02) );
phic(2) = acos( ((dc3^2)-(dc2^2)-(d01^2))/(-2*d01*dc2) );
phic(3) = acos( ((dcc3^2)-(dcc2^2)-(d01^2))/(-2*d01*dcc2) );

for i=1:3

    if ( phic(i) <= (sqrt((1-p)/(1-q))*(tetha/2)) )
        gkc(i) = 1-(((1-q)/((tetha/2)^2))*phic(i)^2);
    elseif ( phic(i) > (sqrt((1-p)/(1-q))*(tetha/2)) )
        gkc(i) = p;
    end

end

.....

% Calculo de la SIRi

for i = 1:3
a(i) = (gkc(i)*vr(108+i))/((distancias(1)^u)*g(108+i));
end

num = sum(a);

```

```
    sir = num/(sum(den));
    m = [2,4,6];
    if (sir < 6*gamma(indice))
        rate = (wc/gamma(indice))*sir;
    elseif (sir >= 6*gamma(indice))
        rate = 6*wc;
    end

    ri(t) = rate;
    t = t+1;
    elseif ((vmx-x0)^2+(vmy-y0)^2 < R^2)
        xin(z) = vmx;
        yin(z) = vmy;
        z = z+1;
    end
end

ratet(indice) = mean(ri);
end
```

```
.....
%% Graficación de resultados
x = [1 2 3 4 5 6];
```

```
plot(x, ratet);
```

```
figure
plot(0,0, 'rx')
hold on
plot(xv, yv)
axis equal
hold on
```

## Apéndice B

### Desempeño de otros reusos convencionales de la red OFDMA

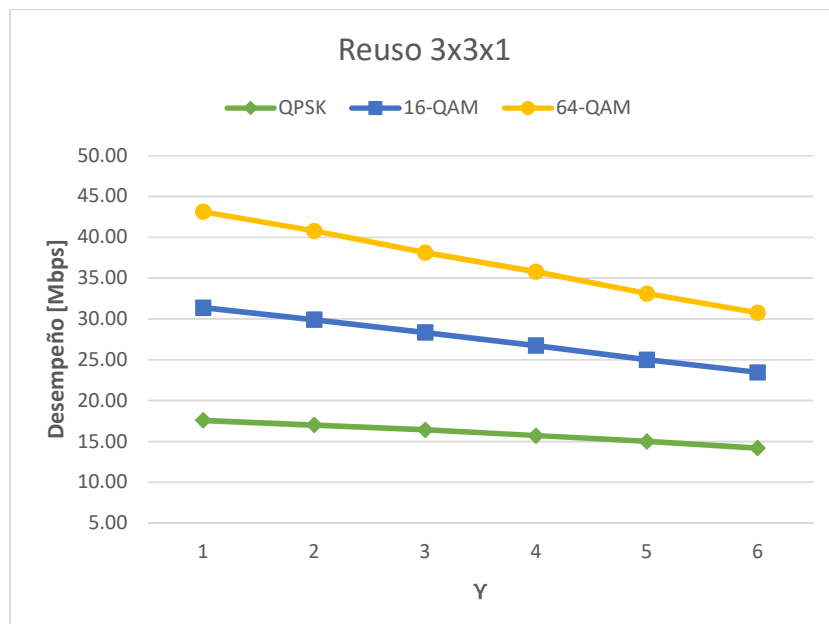


Figura B.1: Desempeño de la red OFDMA con reuso 3x3x1.

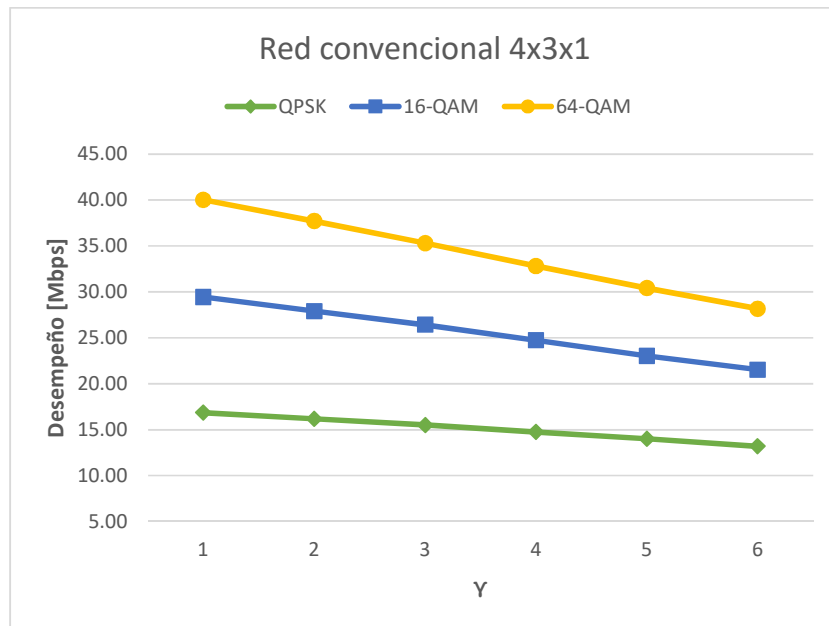


Figura B.2: Desempeño de la red OFDMA con reuso  $4x3x1$ .

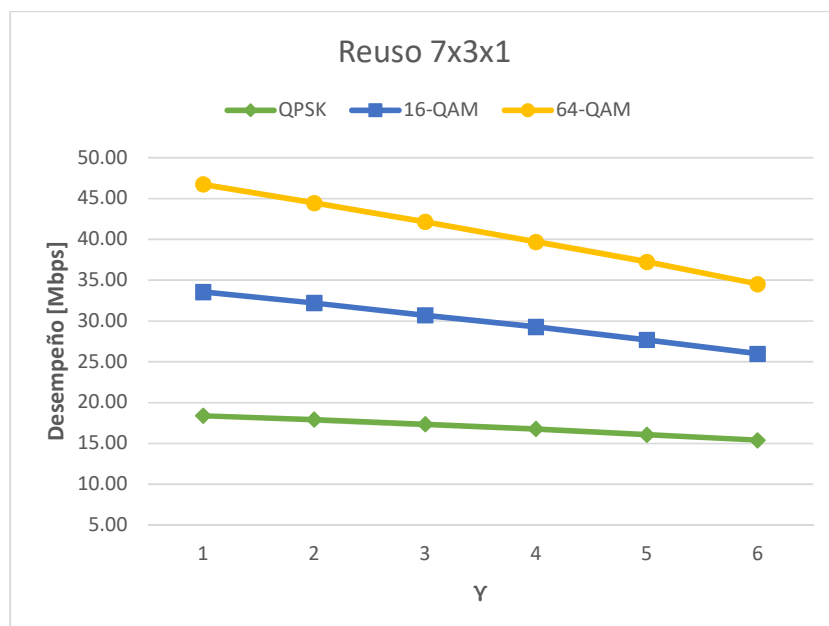
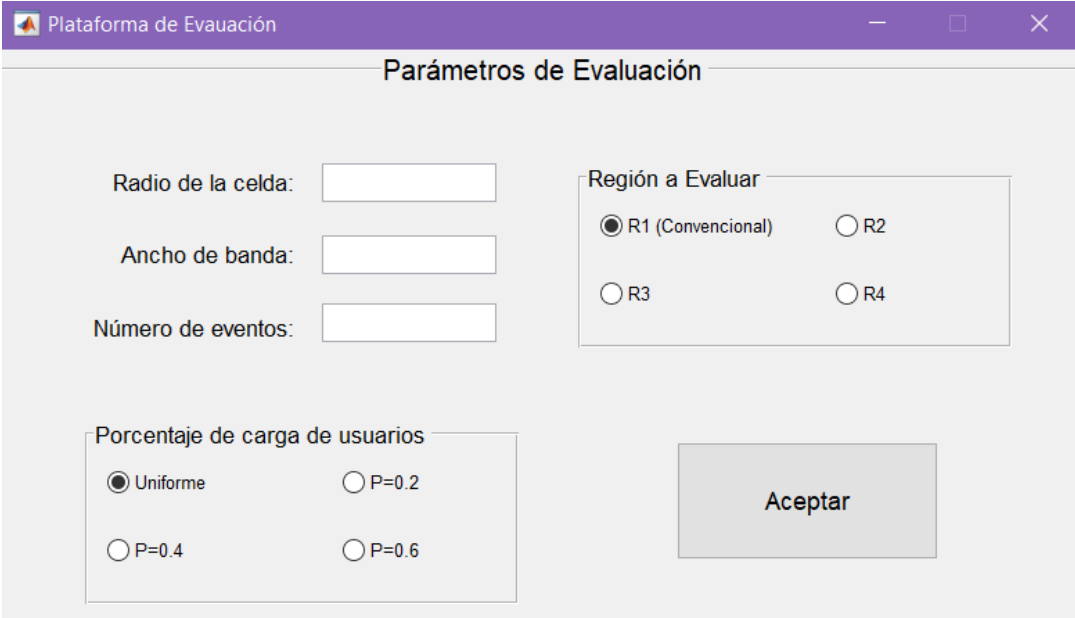


Figura B.3: Desempeño de la red OFDMA con reuso  $7x3x1$ .

# Apéndice C

## Plataforma de evaluación creada en MATLAB®



The screenshot shows a MATLAB window titled "Plataforma de Evaluación" with a purple header bar. The main content area is titled "Parámetros de Evaluación" and contains several input fields and radio button options. On the left, there are three text input fields labeled "Radio de la celda:", "Ancho de banda:", and "Número de eventos:". On the right, there is a section titled "Región a Evaluar" with four radio button options: "R1 (Convencional)", "R2", "R3", and "R4". Below this, there is a section titled "Porcentaje de carga de usuarios" with four radio button options: "Uniforme", "P=0.2", "P=0.4", and "P=0.6". A large "Aceptar" button is located at the bottom right of the interface.

*Figura C.1: Plataforma de evaluación del desempeño del sistema creada en MATLAB®*