

# Universidad Nacional De Ingeniería

“Recinto Universitario Simón Bolívar”

Facultad De Electrotecnia Y Computación



Trabajo Monográfico

*Estudio y Simulación Básica de los Sistemas de Comunicaciones Tipo*

**MIMO Usando MATLAB®**

Elaborado por: Br. Ivania Lisseth Zelaya Rodríguez 2006-24421

Br. Gelman Mijaíl Cerda Urbina 2006-24082

Tutor: Marvin René Arias Olivas, PhD

Managua, Junio 2012



## DEDICATORIA

Se dedica el presente trabajo a los siguientes:

- A Dios por darnos la vida y por ser pilar fundamental en nuestro diario proceder.
- A Nuestros padres por habernos formado como personas llena de valores, por su sacrificio y apoyo incondicional que nos ayudo en la realización de todas nuestras metas personales, como lo fue nuestra tesis monográfica.
- A nuestra familia y amigos, que nos han escuchado cuando necesitábamos hablar, por forzarnos a sonreír cuando sentimos que el mundo se nos viene encima.
- Los alumnos de Ingeniería Electrónica, especialmente a los que forman parte del área de las Telecomunicaciones.
- A Todos los que de una u otra manera, nos apoyaron y nos ayudaron a superar cada uno de los obstáculos que tuvimos alrededor de la presente tesis.

## AGRADECIMIENTO

Brindamos un especial agradecimiento a las siguientes personas:

A nuestros padres y familiares, que con su apoyo incondicional, hemos podido alcanzar esta meta en nuestras.

Al Dr. Marvin René Arias Olivas por ser nuestro tutor, por su increíble paciencia, consejos, por todos los aportes y la ayuda brindada en estos meses y por el tiempo brindado para la discusión y desarrollo de esta tesis.

Al MSc. Marlon Salvador Ramírez Membreño, por su importante apoyo en el inicio de esta tesis, por alentarnos a continuar y por creer siempre en nosotros.

A nuestros amigos, que de varias maneras nos animaron a seguir esforzándonos durante toda mi vida universitaria. Porque en alegrías, enojos, frustraciones y éxitos, han estado con nosotros.

A todos los docentes, por su apoyo y motivación, por que gracias a su arduo trabajo, nos han transmitido conocimientos llevándonos pasó a paso en el buen aprendizaje.

## ABSTRACT

Since the beginning the man has evolved as their needs to communicate increase. An aspect that has developed is wireless communications, which have become in real and necessary. The advance of wireless communication technology as a fundamental part of modern society demands to have a better coverage and also a better quality of service, what leads us to the practice of study and simulation of MIMO (Multiple Input-Multiple Output) because it's one of the new technologies used to increase the capacity of wireless communication systems, which consists in the use of multiple antennas at both sides of the communication link, in this way is possible to achieve efficiencies spectral unthinkable for conventional systems.

One of the ways to analyze the performance of MIMO systems is through simulations, especially the channel capacity, which is accomplished using the software Matlab ®. Using the Shannon's formula, numerous techniques have been developed to exploit the bandwidth available on a channel, in reception and transmission. MIMO systems are presented as one of the most promising technologies with significant improvements in spectrum efficiency, satisfying the demand of high speed data transmission without increasing the bandwidth available or transmit power.

In the following thesis work we simulated the channel capacity vs. *SNR* (Signal-to-noise ratio) and we checked the result theoretically proposed, which tells us that with higher number of antennas, the channel capacity increases linearly. In this thesis we also stress important aspects of such systems and their importance in the standards of 4G mobile telephony and the many techniques they use to provide better efficiency and effectiveness in the quality of services in different scenarios that may arise.

## RESUMEN

El hombre desde su origen ha evolucionado a medida que sus necesidades de comunicarse se incrementan. Uno de los aspectos que ha desarrollado son las comunicaciones inalámbricas, las que se han convertido a su vez en un hecho real y necesario. El avance de la tecnología de la comunicación inalámbrica como parte fundamental de una sociedad moderna demanda tener mejor cobertura y al mismo tiempo mejor calidad de servicio, lo que nos lleva a la práctica del estudio y simulación de los sistemas MIMO, debido que es una de las nuevas tecnologías usadas para incrementar la capacidad de los sistemas de comunicación inalámbricas, que consiste en el uso de múltiples antenas a ambos lados del enlace de la comunicación, de esta forma es posible alcanzar eficiencias espectrales impensables para sistemas convencionales.

Una de las maneras de analizar el desempeño de los sistemas MIMO, es a través de la simulación, sobre todo la capacidad del canal, la cual es llevada a cabo usando el software Matlab<sup>®</sup>. Utilizando la ecuación de Shannon se han desarrollado numerosas técnicas para explotar el ancho de banda disponible en un canal, tanto en recepción como en transmisión. Los sistemas MIMO se presentan como una de las tecnologías mas prometedoras para obtener mejoras notables en la eficiencia espectral, satisfaciendo la demanda de la alta velocidad de transmisión de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda disponible ni la potencia transmitida.

En este siguiente trabajo simulamos la capacidad del canal versus el SNR y comprobamos el resultado planteado teóricamente, el cual nos dice que a mayor cantidad de antenas, la capacidad del canal se incrementa linealmente. En dicha tesis también destacamos aspectos importantes de dichos sistemas, como su importancia en los estándares de telefonía móvil de cuarta generación y las múltiples técnicas que estos utilizan para brindar una mejor eficiencia y eficacia en la calidad de servicios en los diferentes escenarios que pueden presentarse.

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**1G:** First Generation

**2G:** Second Generation

**3G:** Third Generation

**3GPP:** 3rd Generation Partnership Project

**4G:** Fourth Generation

**AES:** Advanced Encryption Standard

**aGw:** Access Gateway

**AMPS:** Advanced Mobile Phone System

**ATM:** Asynchronous Transfer Mode

**BC:** Broadcast Channel

**BER:** Bit Error Rate

**BS:** Base Station

**CCM:** Counter Cipher Mode

**CDMA:** Code Division Multiple Access

**CDR:** Call detail record

**CE:** Channel Estimation

**CID:** Calling Identification

**CMAC:** Counter-based Message Authentication Code

**CN:** Core Network

**CP:** Cyclic Prefix

**CPE:** Customer Premise Equipment

**DAB:** Digital Audio Broadcasting

**DDI:** Direct Inward Dialing

**DL:** Downlink

**DRM:** Digital Radio Modiale

**DRX:** Discontinuous Reception

**DSL:** Digital Subscriber Line

**DSP:** Digital Signal Processor

**D-TxAA:** Dual-Stream Transmit Adaptive Arrays

**DVB-T:** Digital Video Broadcasting Terrestrial

**EAP:** Extensible Authentication Protocol

**EDGE:** Enhanced Data Rates GSM of Evolution

**EGC:** Equal Gain Combining

**eNB:** Evolved Node B

**FDD:** Frequency Division Duplex

**FDE:** Fault Detection and Exclusion

**FEC:** Forward Error Correction

**FFT:** Fast Fourier Transform

**GPRS:** General Packet Radio Service

**GSM:** Global System for Mobile Communications

**HARQ:** Hybrid Automatic Repeat Request

**HFDD:** Half-FDD

**HMAC:** Hash-based Message Authentication Code

**HSDPA:** High Speed Downlink Packet Access

**HSPA:** High-Speed Packet Access

**HSPA+:** High Speed Packet Access Evolution

**HSS:** Home Subscriber Server

**HSUPA:** High Speed Uplink Packet Access

**IF:** Intermediate Frequency

**IMS:** IP Multimedia Subsystem

**IMT:** International Mobile communication

**IP:** Internet Protocol

**ISI:** Inter-symbol Interference

**ITU:** International Telecommunication Union

**JTACS:** Japanese Total Access Communication System

**LDPC:** Low Density Parity Code

**LoS:** Line-of-Sight

**LTE:** Long-Term Evolution

**MAC:** Multiple Access Channel

**MBMS:** Multimedia Broadcast Multicast Services

**MIMO:** Multiple-Input Multiple-Output

**MISO:** Multiple-Input Single-Output

**MME:** Mobility Management Entity

**MP:** Mobile Payments

**MRC:** Maximal Ratio Combining

**NFC:** Near Field Communication

**NLoS:** Non-Line-of-Sight

**NMT:** Nordic Mobile Telephone

**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**OFDMA:** Orthogonal Frequency Division Multiple Access

**PCRF:** Policy and Charging Rules Function

**PDCP:** Packet Data Convergence Protocol

**PKM:** Privacy Key Management

**PSMP:** Power-Save Multi-Poll

**QAM:** Quadrature Amplitude Modulation

**QoS:** Quality of Service.

**RAN:** Radio Access Network

**RF:** Radio Frequency

**RFIS:** Reduced inter-frame spacing

**SAE:** System Architecture Evolution

**SA-FDMA:** Single Carrier - Frequency Division Multiple Access

**SC:** Selection Combining

**SDMA:** Spatial Division Multiple Access

**SIM:** Subscriber Identity Module

**SIMO:** Single-Input Multiple-Output

**SISO:** Single-Input, Single-Output

**SM:** Spatial Multiplexing

**SMS:** Short Message Service

**SNR:** Signal-to-Noise Ratio

**SS:** Subscriber Station

**STBC:** Space-Time Block Coding

**STC:** Space-Time Coding

**TACS:** Total Access Communications System

**TDD:** Time Division Duplex

**TDMA:** Time Division Multiple Access

**TGn:** Task Group N

**UE:** User Equipment

**UIT:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UL:** Uplink

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System

**UTRAN:** UMTS Terrestrial Radio Access Network

**WCDMA:** Wideband Code Division Multiple Access

**WIFI:** Wireless Fidelity

**WIMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WLAN:** Wireless Local Area Network

**WWSE:** World Wide Spectrum Efficiency

**WWRP:** Wireless World Research Forum

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Ejemplo gráfico de la evolución en las aplicaciones<br>(1G-Epoca Actual) ..... | 9  |
| <b>Figura 2:</b> Reseña de la evolución en comunicaciones móviles .....                         | 9  |
| <b>Figura 3:</b> Esquema de Comunicación - Modelo de Shannon-Weaver .....                       | 10 |
| <b>Figura 4:</b> Sistema Tradicional (SISO).....  | 12 |
| <b>Figura 5:</b> Esquema de los sistemas MIMO con un arreglo 2x2 .....                          | 13 |
| <b>Figura 6:</b> Configuración de un Cluster para un sistema celular de N usuarios .....        | 15 |
| <b>Figura 7:</b> Asignación de subportadoras a células según un factor de reuso $F=3$ ..        | 16 |
| <b>Figura 8:</b> Sistema OFDMA con un factor de reuso $F=1$ .....                               | 18 |
| <b>Figura 9:</b> Sistema de comunicación MIMO Multi-usuario $K=4$ .....                         | 20 |
| <b>Figura 10:</b> Grafica expuesta de Matlab® en 3D .....                                       | 23 |
| <b>Figura 11:</b> Ejemplo gráfico del funcionamiento de OFDM .....                              | 25 |
| <b>Figura 12:</b> Modelo MIMO-OFDM: 2 antenas transmisoras y 2 antenas receptoras               | 26 |
| <b>Figura 13:</b> Modelo de bloques de un transmisor MIMO-OFDM .....                            | 27 |
| <b>Figura 14:</b> Modelo de bloques de un receptor MIMO-OFDM .....                              | 28 |
| <b>Figura 15:</b> Funcionamiento del método Beamforming .....                                   | 29 |
| <b>Figura 16:</b> Esquema de Multiplexación espacial .....                                      | 30 |
| <b>Figura 17:</b> Esquema ganancia por diversidad espacial .....                                | 31 |
| <b>Figura 18:</b> Sistemas de Comunicación Según los arreglos de antenas .....                  | 35 |
| <b>Figura 19:</b> Figura demostrativa de la Capacidad de Canal de<br>los Sistemas MIMO .....    | 42 |
| <b>Figura 20:</b> Capacidad del Sistema MISO .....  | 43 |
| <b>Figura 21:</b> Capacidad de Canal de los Sistemas SIMO .....                                 | 43 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22:</b> Capacidad de Canal de los Sistemas SISO .....   | 44 |
| <b>Figura 23:</b> Comparación de los sistemas SISO, SIMO, MISO & MIMO .....   | 45 |
| <b>Figura 24:</b> Capacidad frente a la SNR .....   | 46 |
| <b>Figura 25:</b> Camara Anecoica .....   | 47 |
| <b>Figura 26:</b> Capacidad Ergodica Vs. SNR .....  | 49 |
| <b>Figura 27:</b> Mapa de donde fueron tomadas las mediciones .....   | 49 |
| <b>Figura 28:</b> Configuración de las mediciones de caracterización del canal con<br>el 3D posicionamiento del robot y la antena de la sonda en el lado Rx. .... | 50 |
| <b>Figura 29:</b> Aplicaciones del Estándar IEEE 802.11n .....  | 56 |
| <b>Figura 30:</b> Funcionamiento del estándar IEEE 802.16d .....  | 60 |
| <b>Figura 31:</b> Funcionamiento del estándar IEEE 802.16e .....  | 63 |
| <b>Figura 32:</b> Evolución de HSPA .....   | 68 |
| <b>Figura 33:</b> Red de Acceso E-UTRAN .....   | 71 |
| <b>Figura 34:</b> Arquitectura para LTE .....   | 72 |
| <b>Figura 35:</b> Evolución de LTE .....  | 77 |
| <b>Figura 36:</b> configuración automática del generador de señales .....   | 78 |
| <b>Figura 37:</b> Muestra de Instrumentos de la empresa Rohde & Schwarz .....   | 79 |
| <b>Figura 38:</b> Diagrama del equipo de medidas basado en un<br>analizador de redes multipuerto y un conmutador .....  | 80 |
| <b>Figura 39:</b> Arquitectura del Testbed MIMO-OFDM .....  | 81 |
| <b>Figura 40:</b> Scanner Plano .....   | 82 |
| <b>Figura 41:</b> Interfaz de la aplicación .....   | 83 |

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCION .....  | 1  |
| ANTECEDENTES .....  | 3  |
| OBJETIVOS .....   | 4  |
| Objetivo General .....  | 4  |
| Objetivos Específicos .....   | 4  |
| JUSTIFICACION .....   | 5  |
| MARCO TEORICO .....   | 6  |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....  | 6  |
| 1.1 Introducción a los sistemas de comunicación MIMO .....                | 9  |
| 1.2 Aspectos Teóricos de los Sistemas MIMO .....                          | 11 |
| 1.2.1 Definición de los sistemas MIMO .....                               | 11 |
| 1.2.2 Capacidad de Canal de los sistemas MIMO .....                       | 12 |
| 1.3 MIMO Multi-usuarios .....   | 14 |
| 1.3.1 Evolución .....   | 14 |
| 1.3.2 Reutilización de frecuencia y factor de Reuso .....                 | 15 |
| 1.3.3 Capacidad de Canal para comunicaciones<br>MIMO Multi-usuarios ..... | 18 |
| 1.4 Herramienta de Software .....   | 21 |
| CAPÍTULO 2: MIMO-OFDM .....   | 24 |
| 2.1 Definición de OFDM .....  | 24 |
| 2.1 Descripción de MIMO-OFDM .....  | 25 |
| 2.3 Modelo del sistema MIMO-OFDM .....                                    | 26 |
| 2.3.1 Descripción del modelo MIMO-OFDM en el transmisor .....             | 27 |
| 2.3.2 Descripción del modelo MIMO-OFDM en el receptor .....               | 28 |
| 2.4 Métodos de explotación de Canal .....                                 | 29 |
| 2.4.1 Ganancia de Array o Beamforming .....                               | 29 |
| 2.4.2 Ganancia por multiplexación espacial .....                          | 30 |
| 2.4.3 Ganancia por diversidad espacial .....                              | 30 |
| 2.4.4 Esquemas de diversidad espacial .....                               | 31 |
| 2.4.4.1 Esquemas de diversidad espacial en el transmisor .....            | 31 |
| 2.4.4.2 Esquemas de diversidad espacial en el receptor .....              | 32 |
| 2.5 Funcionamiento de las antenas inteligentes<br>en sistemas MIMO .....  | 32 |
| 2.5.1 Clasificación de Sistemas según los Arreglos de Antenas .....       | 34 |
| 2.5.2 Desempeño de las Antenas inteligentes .....                         | 35 |

|   |    |
|---|----|
| CAPITULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS .....   | 36 |
| 3.1 Desarrollo de las simulaciones .....  | 36 |
| 3.1.1 Simulación de la capacidad de canal de<br>los Sistemas SISO, SIMO, MISO y MIMO .....  | 36 |
| 3.1.2 Resultados Obtenidos .....  | 42 |
| 3.1.3 Comparación de los resultados obtenidos por simulación .....                          | 44 |
| 3.2 Simulación basada en mediciones de campo<br>(Anteriormente realizadas) .....            | 46 |
| 3.3 Comparación entre simulación basada en<br>mediciones de campo & Aspectos Teóricos ..... | 51 |
| CAPITULO 4: APLICACIONES Y CASOS DE ESTUDIO .....   | 52 |
| 4.1 WLAN – IEEE 802.11n .....   | 52 |
| 4.1.1 Aspectos Teóricos .....   | 52 |
| 4.1.2 Aspectos Técnicos .....   | 54 |
| 4.2 WMAX –802.16-2004<br>(IEEE 802.16d) & 802.16- 2005 (IEEE 802.16e) .....                 | 57 |
| 4.2.1 Aspectos Teóricos .....   | 57 |
| 4.2.2 Aspectos Técnicos .....   | 57 |
| 4.2.3 WMAX Fijo .....   | 59 |
| 4.2.4 WMAX móvil .....  | 61 |
| 4.3 3GPP .....  | 63 |
| 4.3.1 HSPA+ (Release 7) .....   | 66 |
| 4.3.2 LTE .....   | 68 |
| 4.3.2.1 Según el reléase 8 .....  | 68 |
| 4.3.2.2 Según el reléase 9 .....  | 73 |
| 4.3.2.3 LTE Advanced (Release 10) .....   | 74 |
| 4.4 Equipos de prueba en el mercado .....   | 77 |
| 4.4.1 Equipos de testing de Rohde & Schwarz .....   | 77 |
| 4.4.2 Casos de estudios utilizando equipos de pruebas .....                                 | 79 |
| CONCLUSIONES .....  | 84 |
| RECOMENDACIONES .....   | 85 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 86 |
| ANEXOS .....  | 87 |
| Anexo A .....   | 87 |
| Anexo B .....   | 91 |
| Anexo C .....   | 92 |

## INTRODUCCION:

Las comunicaciones inalámbricas forman actualmente parte fundamental de nuestra sociedad, el continuo crecimiento en las comunicaciones móviles ha generado la necesidad de conseguir mayores coberturas y al mismo tiempo mejores calidades de servicio (QoS por sus siglas en ingles), para poder así generar diversos servicios desde cualquier sitio y en cualquier momento.

Los nuevos servicios, como transmisión de datos y servicios multimedia, requieren velocidades muy elevadas. La demanda de transferencia de grandes volúmenes de información hace necesario dirigir los esfuerzos hacia soluciones que aumenten la capacidad utilizando los mismos recursos.

Una de las formas de aumentar la capacidad consiste en el uso de múltiples antenas a ambos lados del enlace de la comunicación, de esta forma es posible alcanzar eficiencias espectrales impensables para sistemas convencionales. Esta nueva tecnología se denomina "MIMO" (Múltiple-Input Múltiple-Output)

Los sistemas de comunicaciones con múltiples antenas o sistemas MIMO han generado en la ultima década un gran interés de la comunidad investigadora, la cual esta haciendo un esfuerzo importante para incluir MIMO dentro de los diferentes estándares internacionales, cuando Inicialmente fueron propuestos únicamente para enlaces punto a punto entre un transmisor y un receptor.

Los sistemas MIMO se perfilan como una posible solución para futuros sistemas de comunicaciones inalámbricas o celulares, Sin embargo aun existen muchos desafíos y complejidades únicas que presentan los sistemas de entradas y salidas múltiples en su implementación en sistemas inalámbricos, entre estos desafíos se encuentran Interferencia Co-canal, la pérdida de trayecto y el desvanecimiento multitrayecto.

Al ser utilizados en entornos multitrayecto, los sistemas inalámbricos comerciales aprovechan ampliamente las características multitrayecto de los sistemas de antenas MIMO. Gracias a la consistente mejora potencial del rendimiento del sistema inalámbrico que ofrecen las entradas y salidas múltiples, muchas comisiones de normas en materia de comunicación inalámbrica acaban por adoptarlas o están considerando la posibilidad de usarlas.

Las técnicas MIMO forman parte de todos los siguientes estándares:

- Redes locales WLAN (Wireless Local Area Network):  
IEEE 802.11n
- Redes celulares:  
HSPA+ (High Speed Packet Access plus)  
3GPP-LTE (Long-Term Evolution)
- Redes de acceso banda ancha inalámbrico:  
WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) IEEE  
802.16e

## ANTECEDENTES:

No existe referencia de anteriores proyectos monográficos a nivel de pre-grado en nuestra universidad, en los que se haya desarrollado investigaciones basadas en sistemas de múltiples antenas o sistemas MIMO.

Existen sin embargo proyectos monográficos de nuestra alma mater que se relacionan con el estudio de tecnologías emergentes en Telecomunicaciones, las cuales representan mejoras en los sistemas inalámbricos. A continuación detallamos algunos de ellos.

- **“Estudio Técnico y Económico para la Implementación de la Tecnología WMAX en el Campus Universitario de la UNI”**. Autor: Lester Abdul Olivares Mena. Tutor: Ing. Carlos Rivas Mena (2008)
- **“Estudio Técnico y de Funcionalidad de las Tecnologías Móviles 3G de Mayor Despliegue Global para su Utilización en los Procesos de Enseñanza- Aprendizaje de la Disciplina de Sistemas de Comunicación de la Carrera de Electrónica”**. Autor: Br. Marvin Alberto Martínez Torres. Tutor: Ing. Enrique Hernández García (2009).

Ambas monografías fueron basadas en el estudio de nuevas tecnologías que proveen mejoras cuantitativas en el desempeño de las comunicaciones inalámbricas, tecnologías que en su momento fueron el centro de atención de la comunidad investigadora, cuyo principal interés es brindar respuestas a las miles de interrogantes que pueden surgir acerca del tema.

Como conclusión, podemos decir que ha sido necesario elaborar proyectos de investigación acerca de tecnologías emergentes, tendencias e innovación en las comunicaciones, ya que es sumamente provechoso para nuestra universidad, porque agregan valor y credibilidad ante las demás universidades nacionales e internacionales y además despierta el interés en empresas que reclutan personal delegados al área de investigación y desarrollo de dichas empresas.

## OBJETIVOS:

### Objetivo General

Realizar un estudio de los sistemas MIMO, enfocado en los aspectos técnicos y prácticos, incluyendo la realización de una practica a nivel de simulación mostrando técnicas desarrolladas que permitan su utilidad.

### Objetivos Específicos

- Describir los principios básicos de los sistemas MIMO
- Exponer las aplicaciones de los Sistemas MIMO
- Presentar las ventajas y desventajas que prestan los sistemas MIMO ante los sistemas convencionales de comunicaciones inalámbricas SISO (Single Input, Single Output).
- Evaluar y Comparar la capacidad de canal y demás propiedades básicas de los sistemas MIMO ante los Sistemas SISO, en un ambiente simulado por medio del Software MATLAB.

## JUSTIFICACION:

El presente trabajo monográfico tiene como propósito fundamental realizar un estudio y simulación de los sistemas MIMO, estableciendo así una herramienta de apoyo teórica y practica principalmente para estudiantes en el área de Redes Telefónicas o asignaturas afines al tema.

Los proyectos de investigación son un área importante en el crecimiento de las universidades, ya que permite desarrollar al estudiante las habilidades de búsqueda de información y análisis de los datos obtenidos, de la misma forma permite emplear los conocimientos adquiridos en los años de estudio, en el entendimiento y discernimiento de la información recopilada, situando así criterios propios de ingeniería.

Llevar a cabo un proyecto monográfico de investigación que aborde los sistemas MIMO es necesario ya que es de vital importancia para el área de Telecomunicaciones de la carrera de ingeniería electrónica contar con referencia propia que abastezca la búsqueda de nuevos conocimientos de sus estudiantes, promoviendo así el auto-aprendizaje.

La Elaboración de una práctica simulada de nuestro tema monográfico plantea que el estudiante pueda interactuar y experimentar un poco más con el entorno de este novedoso tipo de sistemas y no únicamente de manera teórica, dando el balance justo entre lo práctico y teórico.

Es preciso para la formación de cualquier estudiante o persona interesada en el área de comunicaciones conocer acerca de los Sistemas MIMO, en ello radica la importancia de este proyecto monográfico, ya que además eleva el nivel de competitividad y comprensión de tecnologías actuales, necesaria en el avance de las Telecomunicaciones.

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios la tecnología inalámbrica se ha visto involucrada en una serie de transformaciones en un ritmo acelerado, ya que desde su origen su principal misión ha sido transportar la mayor cantidad de información en el menor tiempo de manera segura, por cual nos gustaría hacer una breve reseña de su proceso evolutivo, iniciando desde la 1G hasta la propuesta 4G.

**La primera Generación (1G)**, está basada en la tecnología analógica, dichas redes inalámbricas 1G fueron creadas basándose sólo en el tráfico de voz.

Entre los estándares de 1G se encuentran:

- **NMT** (Nordic Mobile Telephone), usado inicialmente en los países Nórdicos, y luego también en Holanda, Europa del Este y Rusia, entre otros.
- **AMPS** (Advanced Mobile Phone System) usado en los Estados Unidos.
- **TACS** (Total Access Communications System) en el Reino Unido.
- **C-450** usado en Alemania Oriental, Portugal y el Sur de África.
- **Radiocom 2000** usado en Francia y RTMI en Italia.

En Japón se implementaron múltiples sistemas, entre los cuales destacan tres estándares, TZ-801, TZ-802, TZ-803, ambos desarrollados por la empresa NTT, con un sistema de competencia operado por **DDI** (Direct Inward Dialing) usando el estándar **JTACS** (Japanese Total Access Communication System), Lanzada comercialmente en los años 80, en la actualidad prácticamente ya no existen, ya que fueron sustituidas por las tecnologías digitales.

**La segunda generación (2G)**, está basada en tecnologías digitales, las redes 2G ofrecen mejor calidad y capacidad de voz que los sistemas 1G, por lo cual se dice que la telefonía móvil 2G no es un estándar o un protocolo sino una forma de marcar el cambio de protocolos de telefonía móvil analógica a digital.

La llegada de la segunda generación de telefonía móvil fue alrededor de 1990 y su desarrollo deriva de la necesidad de poder tener un mayor manejo de llamadas en prácticamente los mismos espectros de radiofrecuencia asignados a la telefonía móvil, para esto se introdujeron protocolos de telefonía digital que además de permitir más enlaces simultáneos en un mismo ancho de banda, permitían integrar otros servicios, que anteriormente eran independientes, en la misma señal, como es el caso del envío de mensajes de texto o Pagina en un servicio denominado **SMS** (Short Message Service) y una mayor capacidad de envío de datos desde dispositivos de fax y módem.

Los sistemas 2G soportan voz y servicios de datos transferidos por circuito y paquetes. La 2G abarca varios protocolos distintos desarrollados por varias compañías e incompatibles entre sí, lo que limitaba el área de uso de los teléfonos móviles a las regiones con compañías que les dieran soporte. Algunos de los conjuntos de protocolos que utilizó la 2G fueron: **GSM** (Global System for Mobile Communications), **TDMA** (Time Division Multiple Access) y el **CDMA** (Code Division Multiple Access).

Existen algunas mejoras tecnológicas y nuevas aplicaciones del estándar como lo son: **GPRS** (General Packet Radio Service) y **EDGE** (Enhanced Data Rates GSM of Evolution) en redes 2G y con tasas de transferencia de datos superiores a los teléfonos 2G regulares pero inferiores a 3G, por lo que se les son conocidos como 2.5G y 2.75G respectivamente.

**La tercera generación (3G)**, es la tecnología actual, la cual está basadas en patrones digitales, las redes 3G ofrecen un aumento en la capacidad de voz y mayores tasas de transmisión de datos que las redes 2G y 2,5G se puede decir que es la abreviación de tercera generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil, además de banda ancha móvil para servicios multimedia e internet. Los servicios asociados con la tercera generación proporcionan la posibilidad de transferir tanto voz y datos (una llamada telefónica o una video-llamada) y datos no relacionados a voz (como la descarga de programas, intercambio de email, y mensajería instantánea).

Aunque la tercera generación estaba orientada a la telefonía celular, desde hace unos años las operadoras de telefonía móvil ofrecen servicios exclusivos de conexión a Internet mediante módem USB, sin necesidad de adquirir un teléfono móvil, por lo que cualquier computadora puede disponer de acceso a Internet. Existen otros dispositivos como algunos ultra-portátiles (netbooks) que incorporan el módem integrado en el propio equipo. La **UIT** (Unión Internacional de Telecomunicaciones) formuló diversos requisitos para las tecnologías 3G, a través de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (**IMT-2000** por sus siglas en inglés). Las que obtuvieron mayor aceptación comercial son el **CDMA2000**, y el **WCDMA** (Wideband Code Division Multiple Access).

Siguiendo con el orden evolutivo nos encontramos con la **cuarta generación (4G)**, que está basada completamente en el protocolo **IP** (Internet Protocol), siendo un sistema de sistemas y una red de redes, que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cables e inalámbricas. Esta tecnología podrá ser usada por modems inalámbricos, celulares inteligentes y otros dispositivos móviles. La principal diferencia con las generaciones predecesoras será la capacidad para proveer velocidades de acceso mayores de 100 **Mbps** en movimiento y 1 **Gbps** en reposo, manteniendo una calidad de servicio de punta a punta de alta seguridad que permitirá ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento, en cualquier lugar, con el mínimo coste posible.

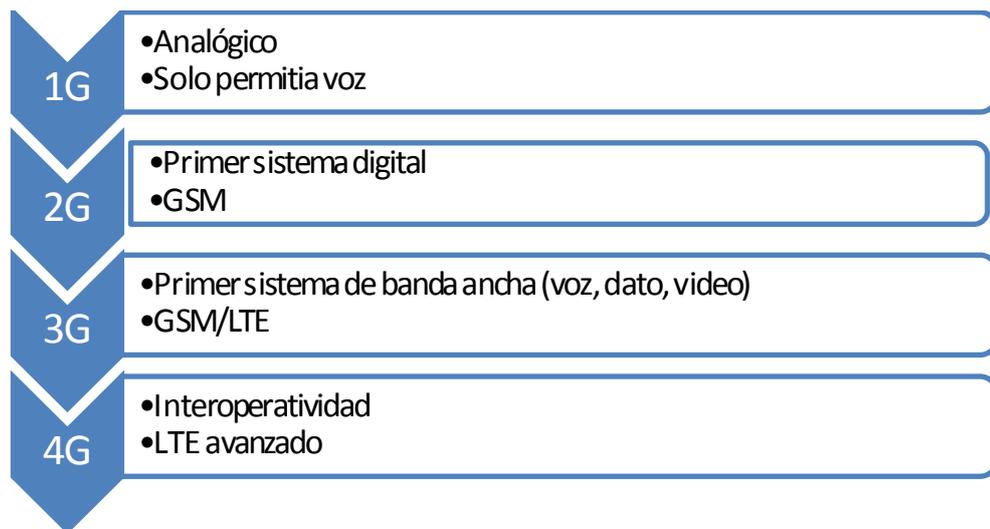
**WWRF** (Wireless World Research Forum) pretende que 4G sea una fusión de tecnologías y protocolos, no sólo un único estándar, similar a 3G, que actualmente incluye tecnologías como lo son GSM y CDMA. Por su parte, el **ITU** (International Telecommunication Union) indicó en 2010 que tecnologías consideradas tecnologías 3G evolucionadas, como lo son **WiMAX** y **LTE**, podrían ser consideradas tecnologías 4G.

En la **Figura 1**, se ejemplifican algunos de los dispositivos que han acompañado a las generaciones.



**Figura 1: Ejemplo gráfico de la evolución en las aplicaciones (1G-Epoca Actual)**

A continuación, en la **Figura 2** se ilustra un diagrama que expresa el proceso evolutivo de la tecnología inalámbrica abordado anteriormente.

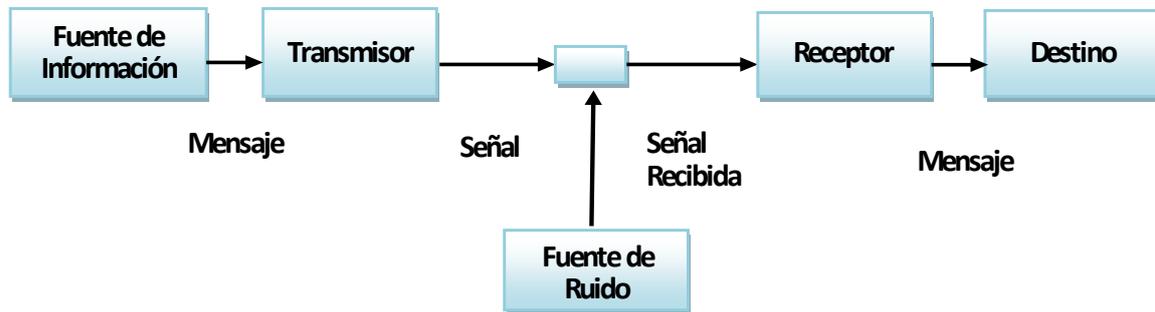


**Figura 2: Reseña de la evolución en comunicaciones móviles**

## 1.1 Introducción a los sistemas de comunicación MIMO

Claude E. Shannon y Warren Weaver a mediados del siglo XX desarrollan los principios definitivos de la Teoría de la Información, la cual se refiere a la medición y representación de la información y de la capacidad de los sistemas para procesar dicha información [1].

En la **Figura 3** se detalla cada uno de los elementos que forman parte del modelo de un sistema de comunicación propuesto por Shannon-Weaver



**Figura 3: Esquema de Comunicación - Modelo de Shannon-Weaver**

Las comunicaciones inalámbricas se rigen bajo estos mismos principios y representación de la teoría de la información, con la diferencia clave que en los sistemas Inalámbricos el medio de propagación es el aire, los dispositivos físicos únicamente se encuentran en el extremo receptor y emisor.

Los sistemas de comunicaciones móviles han seguido evolucionando, orientados a brindar una mayor velocidad de transferencia, así mismo son nuevos los desafíos y complejidades en la implementación de estos nuevos sistemas inalámbricos. Debido al enorme crecimiento en el número de abonados y cantidad de tráfico que experimentan cada día las comunicaciones móviles, las nuevas generaciones de sistemas de comunicación se ven forzados a ofrecer nuevos servicios con enormes tasas de transferencia.

Entre los principales objetivos de los nuevos sistemas de comunicaciones se encuentran, entregar al usuario servicios de mayor rapidez y con mayor cobertura, para obtener dichos objetivos estas nuevas generaciones se diseñan en base a grandes anchos de banda, en cuyas frecuencias existen mayores pérdidas de propagación, superando a las generaciones anteriores.

En consecuencia una cobertura geográfica ideal implicaría una mayor cantidad de estaciones base, lo que implicaría mayores gastos en infraestructura, por lo cual es importante crear esquemas de transmisión más flexibles, pero que a su vez puedan cumplir los objetivos anteriormente planteados, tomando siempre en cuenta la escasez del espectro radio eléctrico.

A partir de la Teoría de la información de Shannon se han desarrollado numerosas técnicas para explotar el ancho de banda disponible en un canal. Winters, Foschini y Telatar fueron los primeros en exponer las bases de los sistemas **MIMO**. Estos sistemas explotan la diversidad espacial tanto en recepción como en transmisión y se presentan como una de las tecnologías más prometedoras para obtener mejoras notables en la eficiencia espectral, satisfaciendo la demanda de alta velocidad de transmisión de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda disponible ni la potencia transmitida.

El uso de múltiples antenas en transmisión y recepción representa una gran evolución con respecto a los esquemas previos de transmisión. A través de la codificación espacio-temporal o mediante el multiplexado de flujos de información por diferentes antenas es posible obtener diversidad espacial en transmisión completa que mejora la calidad del enlace y crea diferentes canales paralelos que aumentan la eficiencia espectral global.

## 1.2 Aspectos Teóricos de los sistemas de comunicación MIMO

A continuación definiremos algunos de los aspectos más importantes de los sistemas de múltiples antenas.

### 1.2.1 Definición de Sistemas MIMO

Los sistemas de comunicaciones MIMO, son sistemas de comunicaciones inalámbricas, los cuales constan del uso de múltiples antenas transmisoras y múltiples antenas receptoras, creando múltiples canales paralelos y haciendo que las señales transmitidas se combinen para obtener una mayor calidad y disminuir la tasa de error de bits (**BER** por sus siglas en inglés) [2].

Nacen con el objetivo de aumentar la capacidad del bucle de radio y obtener enormes eficiencias espectrales sin aumentar el ancho de banda, algo inimaginable para sistemas convencionales. Inicialmente los sistemas de comunicaciones constaban básicamente de una antena transmisora y una antena receptora (**SISO**).

**La Figura 4** nos muestra un ejemplo de un sistema tradicional, utilizando una antena transmisora y una antena receptora



**Figura 4: Sistema Tradicional (SISO)**

Dependiendo el número de arreglos de antenas, se puede mejorar la calidad de enlace, cobertura y capacidad de los sistemas inalámbricos, ante interferencias u otros tipos de problemas en la propagación.

### 1.2.2 Capacidad de canal de los sistemas MIMO

Un canal MIMO está formado por un arreglo  $M \times N$ , con un arreglo de “ $M$ ” antenas trasmisoras y otro arreglo “ $N$ ” de antenas receptoras

La máxima cantidad de información transmitida por un canal simple fue determinada por Shannon, cuya fórmula se expresa de la siguiente forma [3]:

$$\text{bps/Hz} \quad (1.1)$$

Dónde:

$h$ : Ganancia compleja del canal

: Relación señal a ruido (**SNR** por sus siglas en ingles)

A partir de esta fórmula se han desarrollado numerosas técnicas para explotar el ancho de banda disponible en un canal.

La capacidad del canal en los sistemas MIMO deberá ser mayor que la capacidad determinada por Shannon para un canal convencional SISO. Para obtener la capacidad teórica de los sistemas MIMO se aumentan el número de antenas en recepción ( ) y el número de antenas en transmisión ( ), y se obtiene la siguiente expresión [4]:

$$\text{---} \quad \text{bps/Hz} \quad (1.2)$$

Dónde:

: Matriz de identidad

: Conjugado transpuesto de la matriz

M: Número total de las antenas transmisoras

Matriz H: Matriz Normalizada de la respuesta del canal

Al añadir varias antenas tanto en transmisor como receptor se incrementa la capacidad total del sistema y el aumento de esta capacidad se expande conforme más incorreladas o independientes sean las señales recibidas.

La **Figura 5** nos muestra el esquema básico de un sistema de múltiples antenas, en este ejemplo se utiliza un arreglo 2x2, es decir 2 antenas en el área de transmisión y 2 antenas en el área de recepción.

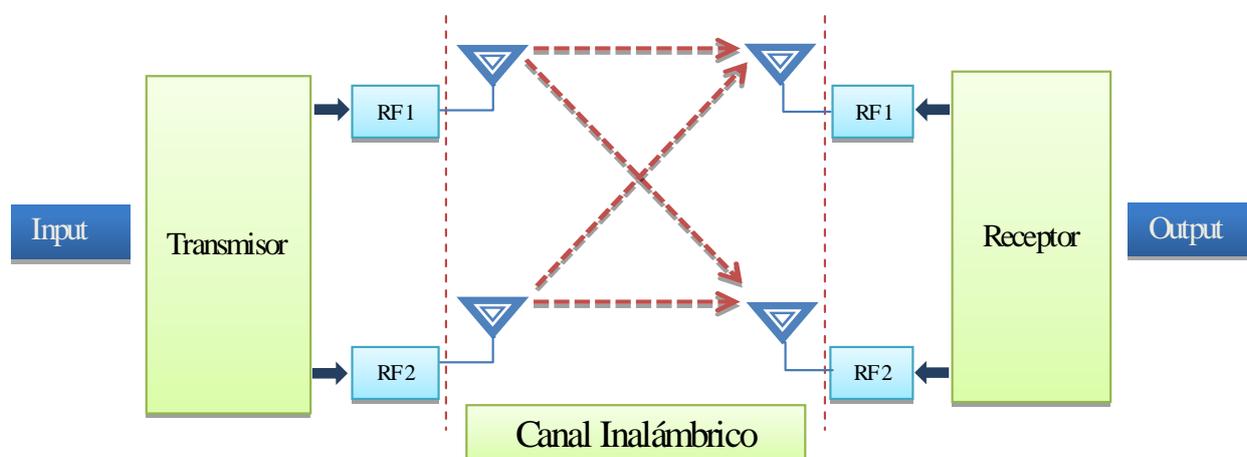


Figura 5: Esquema de los sistemas MIMO con un arreglo 2x2

En un sistema MIMO, la capacidad de canal teóricamente crece de forma lineal, en consecuencia al incremento del número de antenas.

### 1.3 MIMO Multi-usuarios

Las prestaciones que puede brindar los sistemas MIMO dependen de muchas condiciones, entre ellas el tipo de usuarios a las que esta dirigido, es por esto que a continuación hablaremos de los diferentes escenarios que pueden presentarse.

#### 1.3.1 Evolución

Las primeras investigaciones que demostraron las mejoras de los sistemas multi-antenas fueron hechas por Foschini [4] y Teletar [5], los cuales demuestran capacidades teóricas que pueden alcanzar los sistemas MIMO Simple-Usuario o bajo ciertas condiciones y limitaciones. Una de las principales limitaciones de un sistema MIMO Simple-Usuario, tal como lo indica su nombre, es que está limitado a la información de un único usuario.

La estructura general de los sistemas MIMO y su fórmula de capacidad de canal anteriormente descrita fueron planteadas para sistemas con un único usuario, en donde el transmisor equipado con  $N_T$  antenas se comunica con un único receptor provisto con  $N_R$  antenas.

Notoriamente los Sistemas MIMO han ido evolucionando hasta llegar a las configuraciones más avanzadas como lo es MIMO Multi-Usuario [5], donde cada configuración se orienta a técnicas y algoritmos propuestos para resolver distintos problemas de optimización, particularmente, el incremento de la interferencia entre abonados.

MIMO Multi-usuario es un conjunto de técnicas MIMO avanzadas, las cuales aprovechan la disponibilidad de múltiples usuarios disponibles, para mejorar la capacidad de comunicación de cada usuario.

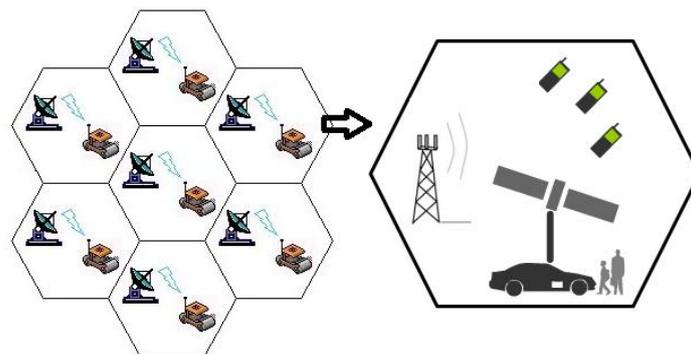
Actualmente el estudio de sistemas MIMO para un único usuario sigue siendo muy importante ya que la forma más común de analizar los sistemas MIMO Multi-Usuario es dividirlo en múltiples sistemas MIMO Simple-Usuario.

### 1.3.2 Reutilización de frecuencia y factor de reuso

Un sistema celular consiste básicamente en la utilización de celdas en zonas de cobertura, dentro de estas celdas se utilizan antenas transmisoras de baja potencia, conocidos como estaciones base (**BS** por sus siglas en inglés).

A la agrupación de celdas se le conoce como “Clusters”, cuya característica principal es agrupar la frecuencia disponible para la Red celular, en donde no se puede reutilizar ninguno de los canales del cluster, pero si podemos reutilizar las bandas de frecuencias asignadas a diferente clusters, debido a esto múltiples usuarios se pueden comunicar simultáneamente bajo la misma frecuencia en diferentes lugares.

En la **Figura 6** mostramos un ejemplo de la configuración de un Cluster con 7 celdas, en cuyas cuales se brindan diferentes tipos de servicios a diferentes usuarios simultáneamente.



**Figura 6: Configuración de un Cluster para un sistema celular de N usuarios**

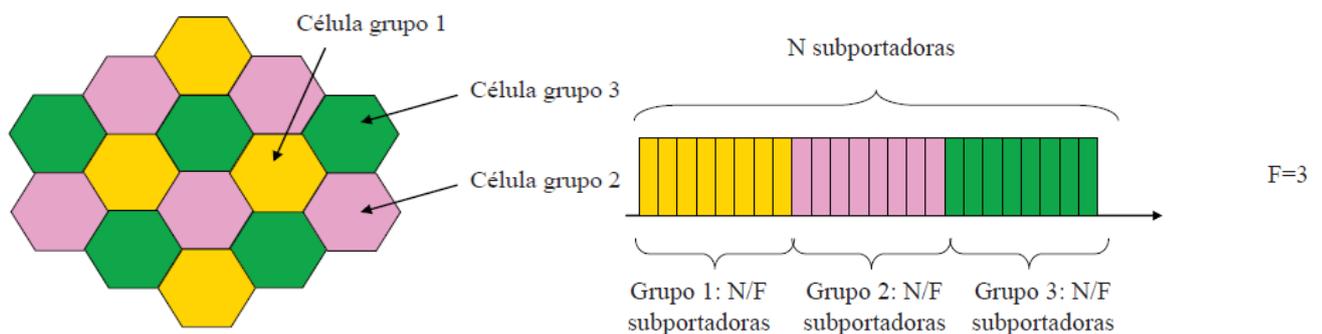
Al implementar la reutilización de frecuencias se presentan 2 señales de interferencia en el receptor, es decir, señales indeseadas que degradan la comunicación y dificultan la recepción de la señal, estas señales indeseables se conocen como Interferencia co-canal e Interferencia del canal adyacente.

Las celdas que presentan una misma banda de frecuencia se conocen como celdas co-canales, a la interferencia entre estas celdas se le conoce como interferencia co-canal, en cambio, las interferencias del canal adyacente son originadas por señales contiguas a la frecuencia de la señal deseada, es decir, señales múltiples en bandas distintas a la señal útil, en ambos casos se utilizan diversos tipos de filtros para corregir y minimizar estas obstrucciones.

En un sistema MIMO Multi-usuario, diversos usuarios de una misma celda intentan conectarse simultáneamente en una misma banda de frecuencia, lo que provoca interferencia co-canal y a su vez crea múltiples usuarios co-canales, que tratan de comunicarse en el mismo canal [7].

**El Factor de Reuso**, es el número de divisiones en  $F$  grupos del conjunto total de subportadoras disponible, cada uno de los cuales se asigna a una célula diferente de un cluster. A su vez, cada uno de los grupos se reutiliza en células pertenecientes a diferentes clústeres.

En la **Figura 7**, se ilustra un proceso para un de factor de reuso  $F=3$ , esto garantiza que células adyacentes no trabajen con las mismas subportadoras y por lo tanto no se interfieran mutuamente.



**Figura 7:** asignación de subportadoras a células con factor de reuso  $F=3$  [Fuente: (8)]

Al incrementar el valor de  $F$ , se consigue alejar más las células que utilizan la misma frecuencia y por lo tanto reducir la interferencia intercelular. Sin embargo, esto es a costa de que el número de subportadoras por célula  $N/F$  se reduce, lo cual se traducirá en una reducción de la capacidad de la célula, por lo que en general no interesará utilizar valores de  $F$  muy elevados.

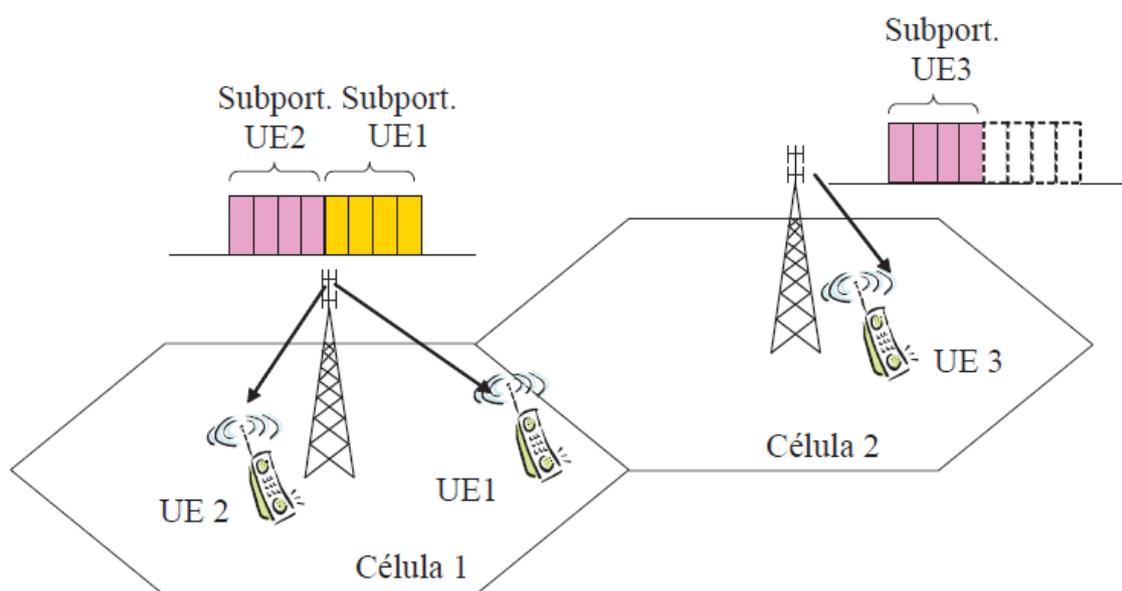
El scheduling de paquetes es responsable de asociar las parejas subportadora/periodo de tiempo a cada uno de los usuarios. El empleo de las técnicas de scheduling de paquetes y de adaptación de enlace permite efectuar dentro de cada célula una gestión dinámica de las subportadoras disponibles, asignándolas a los usuarios según sus condiciones de canal medidas ahora no sólo como relación señal a ruido sino como relación señal a ruido más interferencia.

A diferencia de lo que ocurría en los sistemas de segunda generación como GSM, en OFDMA (Orthogonal Frequency División Multiple Access) la interferencia intercelular no se controla únicamente mediante el reuso de frecuencias sino que también se puede regular mediante un scheduling apropiado. Por este motivo, sería posible trabajar con factores de reuso inferiores, pudiendo llegar incluso a utilizarse un factor  $F=1$  (asignar todas subportadoras disponibles en todas las células).

Es tarea del scheduling asignar apropiadamente las subportadoras a los usuarios, de modo que a aquellos usuarios más susceptibles a la interferencia intercelular, típicamente aquellos que se encuentren en el extremo de la célula, se les asignasen subportadoras que en un momento dado no están siendo utilizadas en las células adyacentes, mientras que a los usuarios menos susceptibles a la interferencia intercelular, típicamente los que se encuentran cerca de la estación base, se les podrían asignar subportadoras utilizadas en otras células.

Un reuso completo  $F=1$  permitiría a una célula disponer potencialmente del máximo de capacidad de transmisión, en tanto que podría llegar a asignar todas las subportadoras disponibles a un único usuario que se encontrara cerca de la estación base y que por lo tanto podría obtener una velocidad de transmisión superior al caso de utilizarse  $F>1$ . Sin embargo, también es cierto que este reuso completo en general tendería a penalizar a los usuarios en el extremo de la célula. En los despliegues celulares 3G, cuando el factor de reuso de frecuencias se convirtió en 1 la interferencia de las células adyacentes degrada la capacidad del sistema [8]

En la **figura 8** se ilustra un sistema celular OFDMA con reuso  $F=1$ , en el cual los terminales UE1 y UE2 se encuentran conectados a la célula 1 y el terminal UE3 a la célula 2. Los terminales UE2 y UE3 se encuentran muy cerca de sus respectivas estaciones base, de modo que ambas estaciones base pueden utilizar el mismo conjunto de subportadoras para ambos usuarios. Por el contrario, para el caso del terminal UE1, que se encuentra ubicado en el extremo de la célula 1, el *scheduling* deberá seleccionar un conjunto de subportadoras que no estén siendo utilizadas por la célula 2, ya que en caso contrario, el terminal UE1 podría percibir un exceso de interferencia.



**Figura 8: sistema OFDMA con un factor de reuso  $F=1$  (Fuente [8])**

### 1.3.3 Capacidad de canal para comunicaciones MIMO Multi-usuarios

La capacidad de los sistemas MIMO, ha recibido mucha atención en los últimos años. Con el paso de los años la industria de la radio comunicación móvil se ha encontrado en crecimiento en orden de magnitud, impulsados por las mejoras en los circuitos digitales y RF (Radio Frequency), los nuevos circuitos integrados de larga escala y la miniaturización de la tecnología hacen los equipos portables más pequeños, baratos y más confiables; también en este impacto cabe destacar que se encuentra involucrado el campo radio celular, para lo cual el gobierno ha sido el regulador en esta evolución en los nuevos sistemas inalámbricos, sus servicios y tecnologías.

En MIMO el uso de varias antenas de elementos para la transmisión de señales y recepción, se espera que desempeñen un papel clave en la mejora del rendimiento de los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricas.

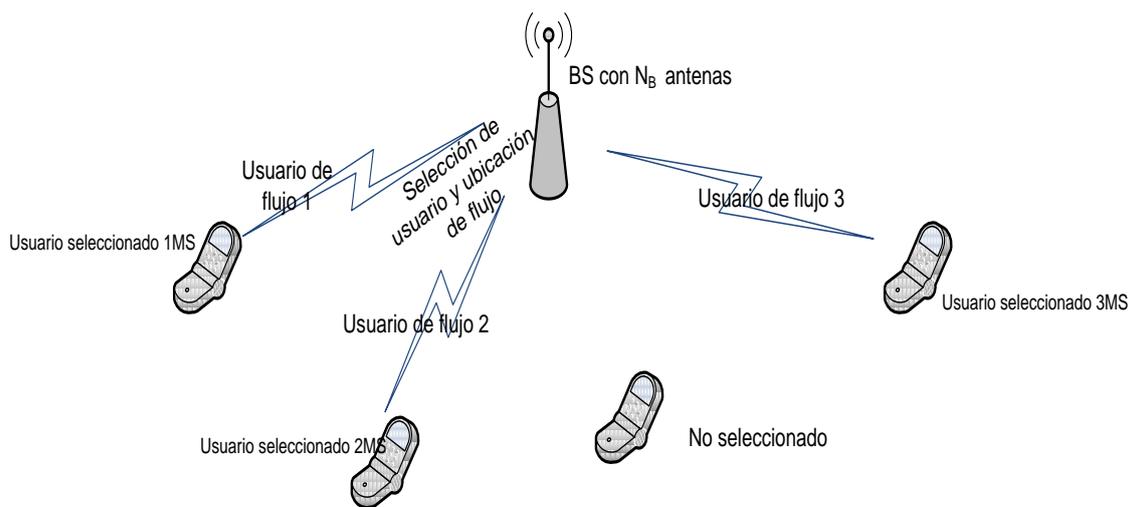
Se ha demostrado que si el desvanecimiento de la señal entre los pares de transmisión y recepción de elementos de las antenas es independiente e idénticamente distribuido, la capacidad de los sistemas MIMO puede aumentar de forma lineal con el número de antenas. Estas condiciones ideales, sin embargo, no se cumplen plenamente en la práctica y la realización de un verdadero sistema MIMO se ve afectada por las condiciones ideales para la propagación y por acoplamiento mutuo efectos, debido a la distancia finita de elementos de antena.

Los antecedentes de estos sistemas se encuentran también en la tecnología de antenas inteligentes, donde un arreglo de antenas permitía, mediante **SDMA** (Spatial Division Multiple Access), comunicarse con múltiples usuarios que estaban separados únicamente por su firma espacial. La configuración básica de un sistema MIMO Multi-usuario, comprende un transmisor (estación base o access point) equipado con  $N_t$  antenas que se comunica con  $M$  usuarios, que disponen de múltiples antenas en recepción.

Un sistema MIMO Multi-usuario también puede interpretarse como un sistema MIMO Simple-usuario donde las  $N_r$  antenas receptoras se distribuyen espacialmente en  $M$  usuarios, cada uno con  $N_m$  antenas disponibles. Las  $N_m$  antenas de cada usuario permiten mitigar la interferencia entre usuarios y aumentan los grados de libertad disponibles para separarlos espacialmente. Sin embargo, existe diferencias esenciales entre los sistemas MIMO Simple-usuario y los MIMO Multi-usuario.

El hecho de distribuir espacialmente las  $N_r$  antenas receptoras, implica que no sea posible coordinar las muestras que reciben los distintos usuarios. Al mismo tiempo, aparecen múltiples restricciones de potencia, una por usuario. Por otro lado, esta distribución de las antenas provoca que el problema Downlink (DL), o enlace transmisor-usuarios, sea distinto al problema Uplink (UL), o enlace usuarios-transmisor. En el enlace UL, el transmisor tiene que separar las señales de los distintos usuarios, mientras que en el enlace DL, los usuarios experimentan interferencias entre ellos.

En el sistema de usuario simple, una alta tasa de datos puede ser soportada por una multiplexación espacial mientras que proporciona una diversa ganancia espacial, sin embargo la mayoría de las comunicaciones trabajan con múltiples usuarios quienes comparten el mismo radio recurso a cómo podemos apreciar en la **Figura 9**.



**Figura 9: Sistema de comunicación MIMO Multi-usuario  $K=4$**

En el sistema MIMO Multi-usuario son referidos los canales de descarga y carga como canales broadcast y canal de acceso múltiple. En el proceso de desarrollo de este documento, veremos que desde que todos los flujos de datos de los usuarios independientes " $K$ " están disponibles para un solo receptor de la estación base, en el canal de acceso múltiple, el sistema MIMO Multi-usuario, es equivalente a un simple usuario  $(K \cdot N_M) \times N_B$  en el sistema de carga MIMO.

Consideramos un sistema MIMO Multi-usuario con un transmisor equipado con  $N_t$  antenas y  $M$  usuarios equipados cada uno con  $N_m$  antenas. El conjunto de usuarios activos,  $M$ , está formado por un subconjunto de los usuarios presentes en el sistema.

El estudio de los sistemas MIMO Multi-usuario desde el punto de vista de teoría de la información proporciona los límites fundamentales del sistema, por ejemplo, indica cuál es la mayor tasa de transmisión de datos que va a poder recibir un usuario en el enlace DL del sistema. En el contexto de teoría de la información, el enlace DL del sistema se denomina Broadcast Channel (**BC**) mientras que el enlace UL es el Multiple Access Channel (**MAC**).

La matriz  $H_m$  es la matriz del canal DL entre el transmisor y el usuario  $m$ ; asumiendo el mismo canal en el enlace UL y DL, la matriz de canal UL del usuario  $m$  sería  $H_m^H$ . En los sistemas single-user MIMO, la capacidad del sistema es un escalar. En los sistemas MIMO multi-usuario, sus límites vienen definidos por una región de capacidad, que es una región de  $M$ -dimensiones, donde cada punto representa un vector formado por el conjunto de tasas de transmisión que alcanzan los  $M$  usuarios simultáneamente,  $(R_1, \dots, R_M)$ . Una zona importante del borde de la región de capacidad son los llamados sumrate points, sum-rate capacity o sum-capacity, que representan los puntos donde el sum-rate o la suma de las tasas de transmisión de datos entre el transmisor y todos los usuarios es máxima (máx  $\sum R_m$ ).

## 1.4 Herramienta de software

Para corroborar los aspectos teóricos de los sistemas MIMO hemos de utilizar una serie de procedimientos matemáticos, por lo cual hemos decidido auxiliarnos en la herramienta MATLAB® para lograr una mejor apreciación del resultado en cada uno de los sistemas y/o ecuaciones que se presentarán en el desarrollo de este documento puesto que no contamos con el equipo ni el presupuesto necesarios para realizar los estudios de campo.

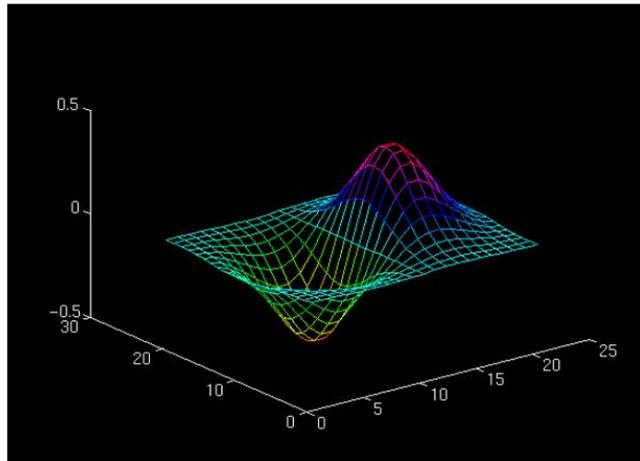
El software dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB® con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

MATLAB® es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos, en donde integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

Puede que existan una serie de lenguajes de programación que nos permitan simular los distintos sistemas que se presentaran en el progreso de nuestro trabajo monográfico ya sean Basic, Fortran, C y C++, pero MATLAB® es un entorno de lenguaje de alto nivel e interactivo que le permite realizar tareas de cálculo más rápido que con los lenguajes de programación tradicionales como lo son los antes mencionados.

MATLAB® es uno de los programas que hemos utilizado a lo largo de nuestra preparación académica y con el que nos sentimos más cómodos trabajando dado a sus resultados en tiempo real y visualización gráfica de las ecuaciones, señales, simulación de sistemas dinámicos, identificación de sistemas, redes neuronales entre otros.

En la **Figura 10**, les mostramos un pequeño ejemplo de las gráficas que podemos lograr utilizando Matlab®.



**Figura 10:** Grafica expuesta de Matlab® en 3D

## CAPITULO 2: MIMO-OFDM

El siguiente capitulo es de suma importancia en nuestro trabajo monográfico ya que las técnicas MIMO-OFDM han sido incrementado la robustez y fiabilidad de los sistemas de múltiples antenas, por lo cual es necesario definir en que esta basado.

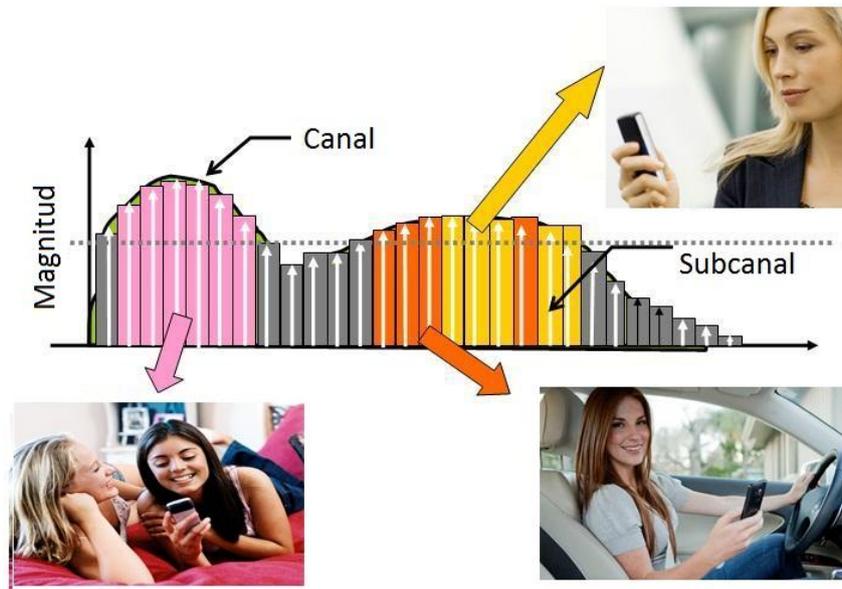
### 2.1 Definición de OFDM

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (**OFDM** por sus siglas en inglés) es un término que nace a mediados de los años 60, surgió como parte de los nuevos esquemas de modulación, ya que posee una alta capacidad de transmisión de datos, además de poseer un ancho de banda con alta eficiencia, fácil implementación y una robustez ante problemas de multitrayecto.

OFDM consiste en la división de todo el ancho de banda en varios subcanales de frecuencia no traslapada, la señal se transmite de forma paralela a través de estos subcanales, enviando así un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta datos. Las subcanales experimentan un desvanecimiento casi plano, lo que reduce la interferencia intersimbólica (**ISI** por sus siglas en ingles) y evita la necesidad de una ecualización compleja.

El espacio de frecuencias que existe entre las subportadoras obtenidas en OFDM es seleccionado para que sean matemáticamente ortogonales. Aunque las subportadoras se pueden mostrar traslapadas, cada una de ellas puede extraerse de manera individual mediante diferentes procesos.

A continuación en la **Figura 11**, les mostramos el funcionamiento de OFDM, así como su posible utilización.



**Figura 11: Ejemplo gráfico del funcionamiento de OFDM**

Ha sido adoptado por los siguientes estándares:

- WiMAX IEEE 802.16
- WiFi (Wireless Fidelity) IEEE 802.11a/g
- Telefonía Móvil LTE 4G
- Estándares europeos como:
  - ETSI en 300 744 (Digital Video Broadcasting Terrestrial, **DVB-T**)
  - ETSI en 300 401 (Digital Audio Broadcasting, **DAB**)
  - ETSI en 201 980 (Digital Radio Modiale, **DRM**)

## 2.2 Descripción de MIMO-OFDM

Aunque existe una gran ganancia en la tasa de datos y la capacidad de canal, producida por la utilización de múltiples antenas receptoras y transmisoras, existen casos para los cuales el canal puede llegar a ser selectivo en frecuencia y al mismo tiempo tener una seria interferencia intersimbólica, en donde la detección de señales se vuelve difícil de implementar.

Para hacer frente a los problemas antes mencionados entre otros, se combinan la técnica de modulación OFDM con el procesamiento de señales de los sistemas de comunicaciones MIMO (MIMO-OFDM), esto permite combatir interferencias intersimbólicas graves y transformar un canal con desvanecimientos selectivos en frecuencia de banda ancha en un conjunto de canales paralelos con desvanecimientos planos.

MIMO-OFDM es una combinación de las ventajas de ambas técnicas y se ha convertido en el esquema más prometedor para el acceso de sistemas de comunicación inalámbrica de banda ancha.

### 2.3 Modelo del Sistema MIMO-OFDM

Según el modelo representativo de MIMO-OFDM, primeramente se codifica el flujo de datos por un codificador espacio tiempo o espacio frecuencia, los datos codificados son divididos en subflujos formando un bloque OFDM transmitido a través de una antena transmisora. En el receptor, las señales recibidas a través de múltiples antenas receptoras son decodificadas usando la información de estado de canal obtenida mediante alguna técnica de estimación.

En la **Figura 12** se presenta el diagrama de bloques del modelo representativo de MIMO-OFDM.

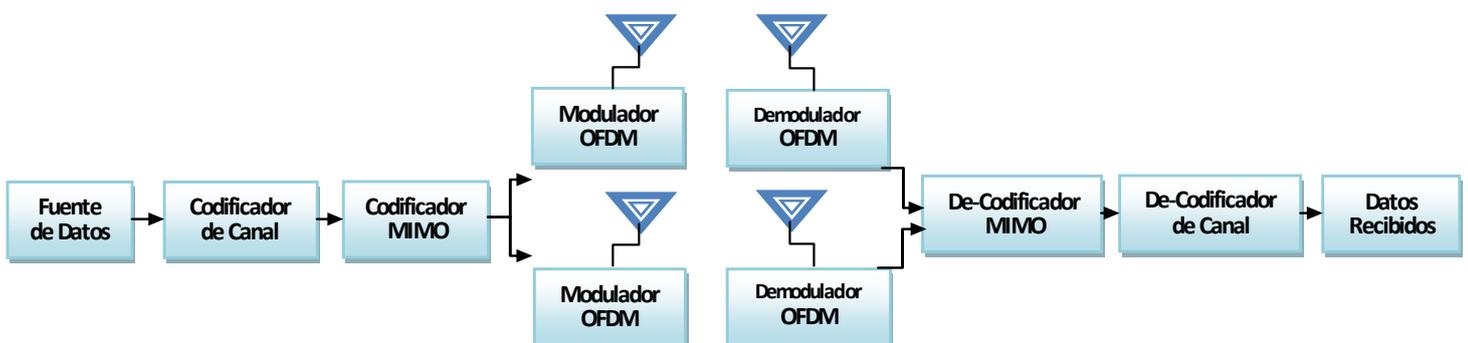


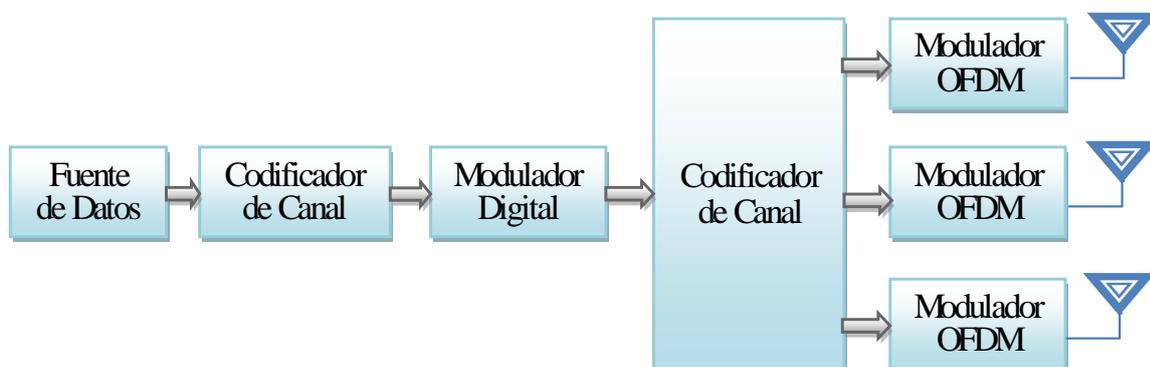
Figura 12: Modelo MIMO-OFDM: 2 antenas transmisoras y 2 antenas receptoras

### 2.3.1 Descripción del modelo MIMO-OFDM en el Transmisor

La fuente de bits (bitstream) es codificada utilizando la técnica **FEC** (Forward Error Correction). Después que el bitstream es codificado, este es convertido en una constelación por medio de un modulador digital, y posteriormente es configurado por un codificador MIMO, donde cada salida corresponde a un flujo de símbolos, que serán modulados utilizando la técnica OFDM y posteriormente transmitidos por una antena.

En el modulador OFDM, símbolos piloto son adicionados de acuerdo a un patrón, para facilitar el proyecto de estimadores de canal. Un prefijo cíclico (**CP** por sus siglas en inglés) es adicionado a cada símbolo OFDM para disminuir el atraso de difusión (delay spread), efecto producido por el canal, y es también adicionado un preámbulo a cada ranura para sincronización. Finalmente el frame de datos construido es transferido a componentes **IF/RF** (Intermediate Frequency/ Radio Frequency) para su transmisión [9], [10].

La **Figura 13**, muestra un diagrama de bloques de un transmisor MIMO-OFDM,



**Figura 13: Modelo de bloques de un transmisor MIMO-OFDM**

### 2.3.2 Descripción del modelo MIMO-OFDM en el Receptor

Los símbolos recibidos en las antenas, son inicialmente sincronizadas en frecuencia y en tiempo con ayuda por el preámbulo. Después que el preámbulo y CP son extraídos del flujo de símbolos recibido, los símbolos OFDM restante son demodulados por la **FFT** (Fast Fourier Transform). Frecuencias pilotos son extraídas de los símbolos OFDM demodulados en el dominio de la frecuencia. La sincronización fina de frecuencia y la sincronización de portadora son utilizadas para extraer pilotos y datos exactamente para su posterior procesamiento.

Las frecuencias piloto extraídas de las señales recibidas son utilizadas, para la estimación de canal **CE** (Channel Estimation). La matriz del canal ayuda al decodificador MIMO, en la obtención de los símbolos OFDM deseados, los cuales son demodulados y decodificados. Finalmente el bitstream llega a su destino [9] [10].

La **Figura 14**, muestra un diagrama de bloques de un Receptor MIMO-OFDM

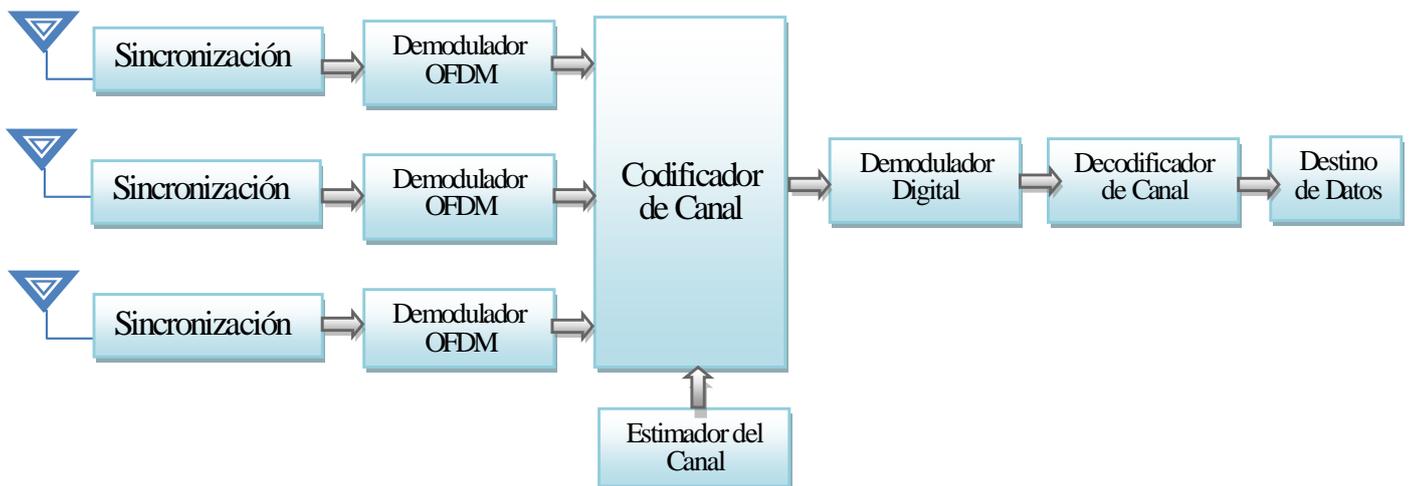


Figura 14: Modelo de bloques de un receptor MIMO-OFDM

## 2.4 Métodos de explotación de canal

Entre los más importantes se encuentran: Beamforming, Multiplexación Espacial & Diversidad, los cuales serán detallados a continuación.

### 2.4.1 Ganancia de Array o Beamforming

Es el aumento de la relación señal a ruido  $\rho$  producto del procesamiento o combinación de señales en el transmisor y en el receptor. Para obtener esta ganancia el transmisor o el receptor deben conocer el estado del canal.

La ganancia de un arreglo se suele implementar en el receptor ya que resulta más sencillo que este conozca la respuesta del canal, debido a que el receptor puede conocer el estado del canal mediante las secuencias de entrenamiento, sin embargo el transmisor requiere de un canal de realimentación.

Debido a lo anterior, un sistema para un canal MIMO  $M \times N$  se puede dividir en 2 tipos: Lazo Abierto (Sin Realimentación) y Lazo Cerrado (con Realimentación), los sistemas de lazo cerrado son adecuados para entornos de baja movilidad, mientras que los sistemas de lazo abierto son adecuados para entornos de alta movilidad.

En la **Figura 15**, podemos observar un arreglo de 4 antenas que pueden ser usados para crear un haz direccional para la recepción de señal en una dirección deseada.

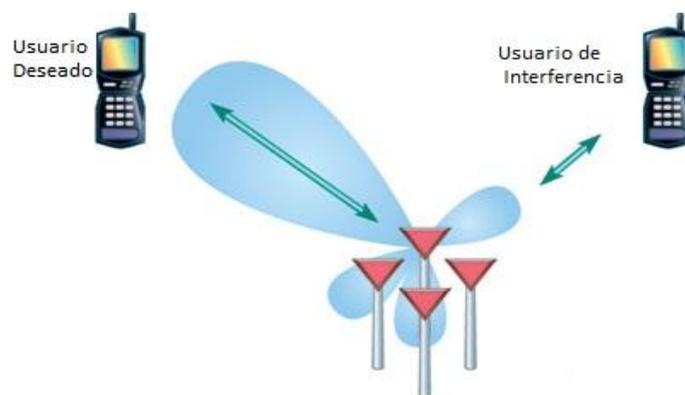
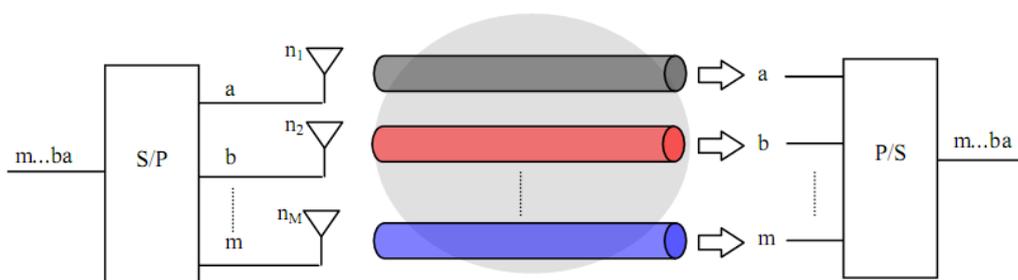


Figura 15: Funcionamiento del método Beamforming

## 2.4.2 Ganancia por multiplexación espacial

La ganancia producida por multiplexado espacial es el incremento lineal originado mediante la transmisión de flujos de información de manera independiente por diferentes antenas de un sistema MIMO de manera simultánea, sin requerir de cambios en potencia o ancho de banda.

En la **Figura 16**, podemos observar un esquema multiplexación espacial, utilizando un arreglo 3x3.



**Figura 16: Esquema de Multiplexación espacial**

Al aumentar la velocidad de transmisión de datos sin requerir de más potencia ni ancho de banda se obtiene una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal y sin necesidad que el transmisor conozca el estado del canal.

## 2.4.3 Ganancia por diversidad espacial

La diversidad consiste en aprovechar las réplicas de la señal transmitida que se propague por canales en los cuales el desvanecimiento sea independiente, lo que puede asegurar que aunque una de las réplicas se desvanezca, las otras posean el nivel suficientemente como para poder estabilizar y reconstruir la señal transmitida, cuando el receptor procese y combine las señales recibidas.

La ganancia por diversidad produce una gran mejora en la SNR de los sistemas MIMO con respecto a los sistemas SISO, lo que produce una mayor calidad en el rendimiento del canal y a su vez un efecto de fiabilidad.

Existen múltiples tipos de ganancia por diversidad, entre los más conocidos se encuentran: diversidad por frecuencia, diversidad en tiempo y diversidad en espacio. La diversidad espacial ocupa una preferencia especial ya que esta no provoca daños en la eficiencia espectral de un sistema.

En la **figura 17** se ilustra un ejemplo de ganancia de diversidad en el cual el receptor recibe 2 señales del extremo transmisor, una de ellas es la replica de la señal deseada.

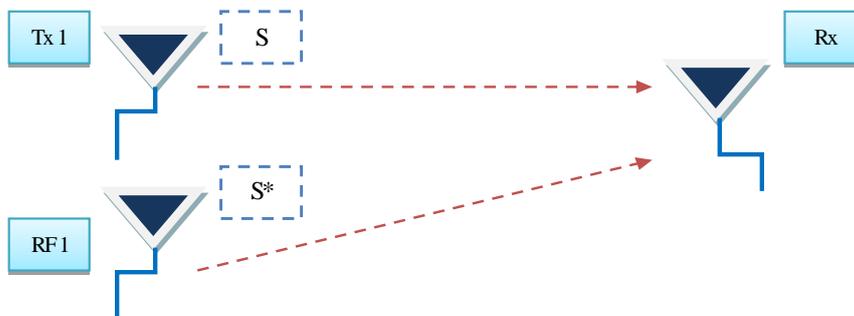


Figura 17: Esquema ganancia por diversidad espacial

## 2.4.4 Esquemas de diversidad espacial

Los esquemas dependen de los extremos a evaluarse (transmisor o receptor), ambos requieren diferentes tratamientos.

### 2.4.4.1 Esquemas de diversidad espacial en el transmisor

El objetivo básico de estas técnicas es igual a las usadas en el receptor, sin embargo el transmisor requiere de un tratamiento especial ya que las señales transmitidas se combinan espacialmente antes de llegar al receptor, por eso es necesario un procesado en transmisión y recepción para conseguir separar las señales recibidas y conseguir ganancia por diversidad. Si el transmisor desconoce el estado del canal no puede adaptar la estrategia de transmisión al estado del canal.

Entre las técnicas de aprovechamiento por diversidad espacial en el transmisor se encuentran: **Space-Time Coding (STC)** y **Spatial Multiplexing (SM)**, el primero aprovecha la diversidad espacial con el objetivo de reducir la probabilidad de error y el último aumenta la capacidad del canal para una relación señal a ruido  $\rho$  dada mediante la multiplexación espacial de la información a transmitir, bajo el principio básico de transmitir la información de forma independiente en cada antena.

#### 2.4.4.2 Esquemas de diversidad espacial en el receptor

Se desarrolla para de reducir los desvanecimientos generados por el efecto multicamino y mejorar la SNR, en este método se utilizan varias antenas separadas a cierta distancia, dichas antenas reciben una réplica en escala de la señal transmitida, la distancia entre antenas receptoras debe ser suficiente para poder separar de manera independiente el desvanecimiento sufrido por cada uno de los canales y lograr que ambas señales recibidas no sufran un desvanecimiento simultáneamente.

Entre las técnicas más importantes de explotación por diversidad espacial para combinar las señales de las antenas receptoras se encuentran: Selection Combining (**SC**), Maximal Ratio Combining (**MRC**) & Equal Gain Combining (**EGC**).

## 2.5 Funcionamiento de las antenas inteligentes en sistemas MIMO

La selección del tipo de antena depende principalmente de la geometría del sector celular (macro, micro, etc.) y del monto económico que puede significar el despliegue.

Las primeras antenas utilizadas eran omnidireccionales, es decir, irradiaban y recibían señales hacia y desde todas las direcciones. No poseían la capacidad de adaptar sus recursos a las condiciones de radio, estaba limitada a solo evitar los desafíos ambientales en función de la potencia de la señal irradiada. La estrategia omnidireccional impactaba directamente y adversamente en la eficiencia espectral, limitando la reutilización de frecuencia.

La siguiente mejora consistió en desarrollar un sistema sectorizado de antenas usando antenas direccionales. Un sistema sectorizado de antenas toma un área celular tradicional y la subdivide en sectores que son cubiertos por antenas direccionales localizadas en la misma estación base. Una celda con un lóbulo de radiación de 360° es dividida en tres lóbulos de 120°.

Una antena inteligente es la combinación de un arreglo de antenas con una unidad de Procesamiento Digital de Señales (**DSP** por sus siglas en inglés) que optimiza los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno.

Las antenas inteligentes ofrecen beneficios en términos de capacidad y funcionamiento con relación a las antenas estándares, pues tienen la posibilidad de adaptar su patrón de radiación y adaptarse a un tipo determinado de tráfico o a entornos difíciles. Están siendo empleadas en las principales redes inalámbricas, reemplazando equipamiento obsoleto en celdas ya existentes y aumentando el rendimiento en más del 50% respecto al anterior.

El procesamiento de señal de la antena inteligente se realiza en la estación base, en donde se emplea un haz estrecho y configurable para cada usuario. Se ha visto buenos resultados de su implementación en redes de tercera generación donde se avalan los aumentos de capacidad de usuario de hasta tres veces respecto a la capacidad original.

Una de las desventajas del uso de sistemas de antenas inteligentes es su complejidad en el software y hardware y el gran costo que puede significar su despliegue.

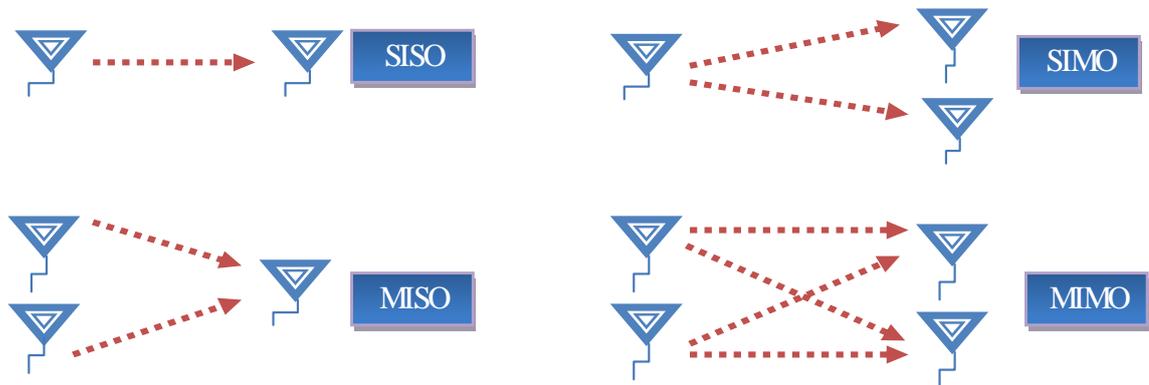
Las antenas inteligentes pueden jugar un papel importante en mejorar las prestaciones, para asegurar la compatibilidad con la cobertura de sitios de radio de los operadores celulares. Las prestaciones alcanzables en términos de distancia dependen de diferentes parámetros, incluyendo el entorno, esquema de modulación, ganancia de la antena, potencia de transmisión, altura de antena y banda de frecuencias [11].

### 2.5.1 Clasificación de Sistemas según los Arreglos de Antenas

Dependiendo el tipo de arreglos de antenas que presenta cada enlace, se pueden clasificar en:

- **SISO:** Sistemas tradicionales formados por una única antena transmisora y otra receptora
- **MISO** (Multiple-Input Single-Output): Arreglos de antenas sólo en transmisión, donde para diferentes transmisores existe una antena receptora, la cual puede identificar a cada transmisor. Con esto se puede conseguir que la señal transmitida sea más robusta y permita que se disminuya la relación señal a ruido.
- **SIMO** (Single-Input Multiple-Output): Arreglos de antenas sólo en recepción, sucede lo contrario que en el sistema MISO, pues ahora se tiene que para cada transmisor hay varios receptores. Aquí la tasa de transmisión no cambia pero la señal en los bordes de las celdas se mejoran al disminuir la relación S/R.
- **MIMO:** Arreglos de antenas en transmisión y recepción.

A continuación, en la **Figura 18** podremos observar los sistemas en dependencia del tipo de arreglos de antenas en el que están basados.



**Figura 18: Sistemas de Comunicación Según los arreglos de antenas**

## 2.5.2 Desempeño de las Antenas inteligentes

Las antenas son instaladas en las estaciones base y en cuanto a los **CPE's** (Customer Premise Equipment) están ubicados en el lado receptor (Cliente).

Los sistemas avanzados como el de antenas inteligentes tienen una inversión más alta pero proveen de otros beneficios que justifican esta inversión, beneficios que se pueden resumir en:

- Flexibilidad
- Un radio de cobertura más amplio debido a que la ganancia total del arreglo de antenas es mayor que la ganancia individual de cada antena.
- Aumentar la calidad de la señal a través de la transmisión más directa,
- Añade refuerzo de capacidad debido al reuso de frecuencias.

## CAPITULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En los capítulos anteriores se ha desarrollado los aspectos teóricos, definición, la capacidad del canal de los sistemas MIMO, así como también la definición de OFDM, para tener fundamentos al hacer la comparación entre MIMO y OFDM los cuales nos permitieron ver los beneficios de ambos y por lo tanto en este capítulo queremos presentar las simulaciones de la evolución los sistemas MIMO.

### 3.1 Desarrollo de las simulaciones

Para el estudio de nuestro documento monográfico es muy importante resaltar la importancia de la capacidad de los sistemas MIMO, es por esto que en esta sección para apreciar dicha importancia, simularemos la capacidad del sistema tanto en SISO, SIMO, MISO y MIMO.

#### 3.1.1 Simulación de la capacidad de canal de los Sistemas SISO, SIMO, MISO y MIMO.

Con la simulación de los diferentes sistemas podremos llegar a un resultado que nos permitirá comparar las ventajas de MIMO sobre los demás sistemas antecesores (SISO, SIMO y MISO) y donde los parámetros que utilizamos son ideales como por ejemplo  $N_0$  es la densidad del ruido y es igual a  $1e-4$ ;  $B$  que es el ancho de banda, lo igualamos a 1; SNR, relación señal ruido = 10 dB y donde la potencia ( $P_t$ ) es el producto de la multiplicación de  $P_t = N_0 * SNR_V(i)$ .

A continuación podremos observar el algoritmo que nos lleva a la simulación de MIMO:

```
% En este programa se considera un entorno altamente disperso. Se
% analiza la capacidad de un canal MIMO con nt antena de transmisión y
nr antenas de recepción.
% El poder en el canal paralelo (después de
% la descomposición) se distribuye como algoritmo de llenado de agua.
```

```
clear all
```

```

close all
clc

nt_V = [1 2 3 2 4];
nr_V = [1 2 2 3 4];

N0 = 1e-4;
B = 1;
Iteration = 1e4; % Debe ser mayor que 1e2

SNR_V_db = [-10:3:20];
SNR_V = 10.^(SNR_V_db/10);

color = ['b'; 'c'; 'g'; 'r'; 'k'];
notation = ['-s'; '-^'; '<-'; '-o'; '->'];

for(k = 1 : 5)
    nt = nt_V(k);
    nr = nr_V(k);
    for(i = 1 : length(SNR_V))
        Pt = N0 * SNR_V(i);
        for(j = 1 : Iteration)
            H = random('rayleigh',1,nr,nt);
            [S V D] = svd(H);
            landas(:,j) = diag(V);
            [Capacity(i,j) PowerAllo] =
WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
        end
    end

    f1 = figure(1);
    hold on
    plot(SNR_V_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:))

    f2 = figure(2);
    hold on
    [y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
    plot(x,y/Iteration,'color',color(k,:));
    clear landas
end

f1 = figure(1)

legend_str = [];
for( i = 1 : length(nt_V))
    legend_str = [ legend_str ; ...
        {'nt = ',num2str(nt_V(i)), ' , nr = ',num2str(nr_V(i))}];
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1,'color',[1 1 1])
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacidad bits/s/Hz')

f2 = figure(2)
legend(legend_str)
grid on
set(f2,'color',[1 1 1])
ylabel('Elementos en matriz Landa en descomposición SVD de Matriz H')

```

El programa que veremos a continuación nos muestra la simulación del sistema MISO:

```

% En este programa se considera un entorno altamente disperso. Se
% analiza la capacidad de un canal SIMO con nt antenas de transmisoras
% y
% nr=1 antena de recepción. El poder en el canal paralelo (después de
% la descomposición) se distribuye como algoritmo de llenado de agua.

clear all
close all
clc
nt_V = [1 2 3 2 4];
nr_V = [1 1 1 1 1];

N0 = 1e-4;
B = 1;
Iteration = 1e4; % debe ser mayor que 1e2

SNR_V_db = [-10:3:20];
SNR_V = 10.^(SNR_V_db/10);

color = ['b'; 'r'; 'g'; 'k'; 'c'];

notation = ['-o'; '->'; '<-'; '-^'; '-s'];

for(k = 1 : 5)
    nt = nt_V(k);
    nr = nr_V(k);
    for(i = 1 : length(SNR_V))
        Pt = N0 * SNR_V(i);
        for(j = 1 : Iteration)
            H = random('rayleigh',1,nr,nt);
            [S V D] = svd(H);
            if (~isvector(V))
                landas(:,j) = diag(V);
            else
                landas(:,j) = V(1,1);
            end
            [Capacity(i,j) PowerAllo] =
WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
        end
    end

    f1 = figure(1);
    hold on
    plot(SNR_V_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:))

    f2 = figure(2);
    hold on
    [y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
    plot(x,y/Iteration, 'color',color(k,:));
    clear landas
end

```

```

f1 = figure(1)

legend_str = [];
for( i = 1 : length(nt_V))
    legend_str = [ legend_str ; ...
        {[ 'nt = ', num2str(nt_V(i)), ' , nr = ', num2str(nr_V(i)) ]}];
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1, 'color', [1 1 1])
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacity bits/s/Hz')

f2 = figure(2)
legend(legend_str)
grid on
set(f2, 'color', [1 1 1])
ylabel('pdf of elements in matrix lambda in svd decomposition of matrix H')

```

En este nuevo programa se nos permitirá apreciar la simulación del sistema SIMO:

```

% En este programa se considera un entorno altamente disperso. Se
% analiza la capacidad de un canal SIMO con nt=1 antena de transmisión
% y
% nr antenas de receptoras. El poder en el canal paralelo (después de
% la descomposición) se distribuye como algoritmo de llenado de agua.

```

```

clear all
close all
clc

nt_V = [1 1 1 1 1];
nr_V = [1 2 2 3 4];

N0 = 1e-4;
B = 1;
Iteration = 1e4; % debe ser mayor que 1e2

SNR_V_db = [-10:3:20];
SNR_V = 10.^(SNR_V_db/10);

color = ['b'; 'r'; 'g'; 'k'; 'c'];
notation = ['-o'; '->'; '<-'; '-^'; '-s'];

for(k = 1 : 5)
    nt = nt_V(k);
    nr = nr_V(k);
    for(i = 1 : length(SNR_V))
        Pt = N0 * SNR_V(i);
        for(j = 1 : Iteration)
            H = random('rayleigh', 1, nr, nt);
            [S V D] = svd(H);
            if (~isvector(V))

```

```

        landas(:,j) = diag(V);
    else
        landas(:,j) = V(1,1);
    end
    [Capacity(i,j) PowerAllo] =
WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
    end
end

f1 = figure(1);
hold on
plot(SNR_V_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:))

f2 = figure(2);
hold on
[y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
plot(x,y/Iteration, 'color',color(k,:));
clear landas
end

f1 = figure(1)

legend_str = [];
for( i= 1 : length(nt_V))
    legend_str =[ legend_str ;...
        {'nt = ',num2str(nt_V(i)), ' , nr = ',num2str(nr_V(i))}];
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1, 'color',[1 1 1])
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacity bits/s/Hz')

f2 = figure(2)
legend(legend_str)
grid on
set(f2, 'color',[1 1 1])

ylabel('pdf of elements in matrix landa in svd decomposition of marix
H')

```

De igual manera en el siguiente programa podemos observar la simulación del sistema SISO:

```

% En este programa se considera un entorno altamente disperso. Se
% analiza la capacidad de un canal SISO con nt=1 antena de transmisión
y
% nr=1 antena de recepción. El poder en el canal paralelo (después de
% la descomposición) se distribuye como algoritmo de llenado de agua.

clear all
close all
clc

nt_V = [1 1 1 1 1];
nr_V = [1 1 1 1 1];

```

```

N0 = 1e-4;
B = 1;
Iteration = 1e4; % Debe ser mayor que 1e2

SNR_V_db = [-10:3:20];
SNR_V = 10.^(SNR_V_db/10);

color = ['b';'c';'g';'r';'k'];
notation = ['-s';'-^';'<-';'-o';'->'];

for(k = 1 : 5)
    nt = nt_V(k);
    nr = nr_V(k);
    for(i = 1 : length(SNR_V))
        Pt = N0 * SNR_V(i);
        for(j = 1 : Iteration)
            H = random('rayleigh',1,nr,nt);
            [S V D] = svd(H);
            landas(:,j) = diag(V);

[Capacity(i,j) PowerAllo]=WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
            end
        end

        f1 = figure(1);
        hold on
        plot(SNR_V_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:))

        f2 = figure(2);
        hold on
        [y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
        plot(x,y/Iteration,'color',color(k,:));
        clear landas
    end

f1 = figure(1)

legend_str = [];
for( i = 1 : length(nt_V))
    legend_str =[ legend_str ;...
        {'nt = ',num2str(nt_V(i)), ' , nr = ',num2str(nr_V(i))}];
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1,'color',[1 1 1])
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacidad bits/s/Hz')

f2 = figure(2)
legend(legend_str)
grid on
set(f2,'color',[1 1 1])
ylabel('pdf of elements in matrix landa in svd decomposition of marix H')

```

### 3.1.2 Resultados Obtenidos

Las gráficas de los resultados de los sistemas SISO, SIMO, MISO y MIMO utilizando la herramienta Matlab nos permitirá tener una mejor apreciación de estos.

A continuación mostramos la gráfica del sistema MIMO:

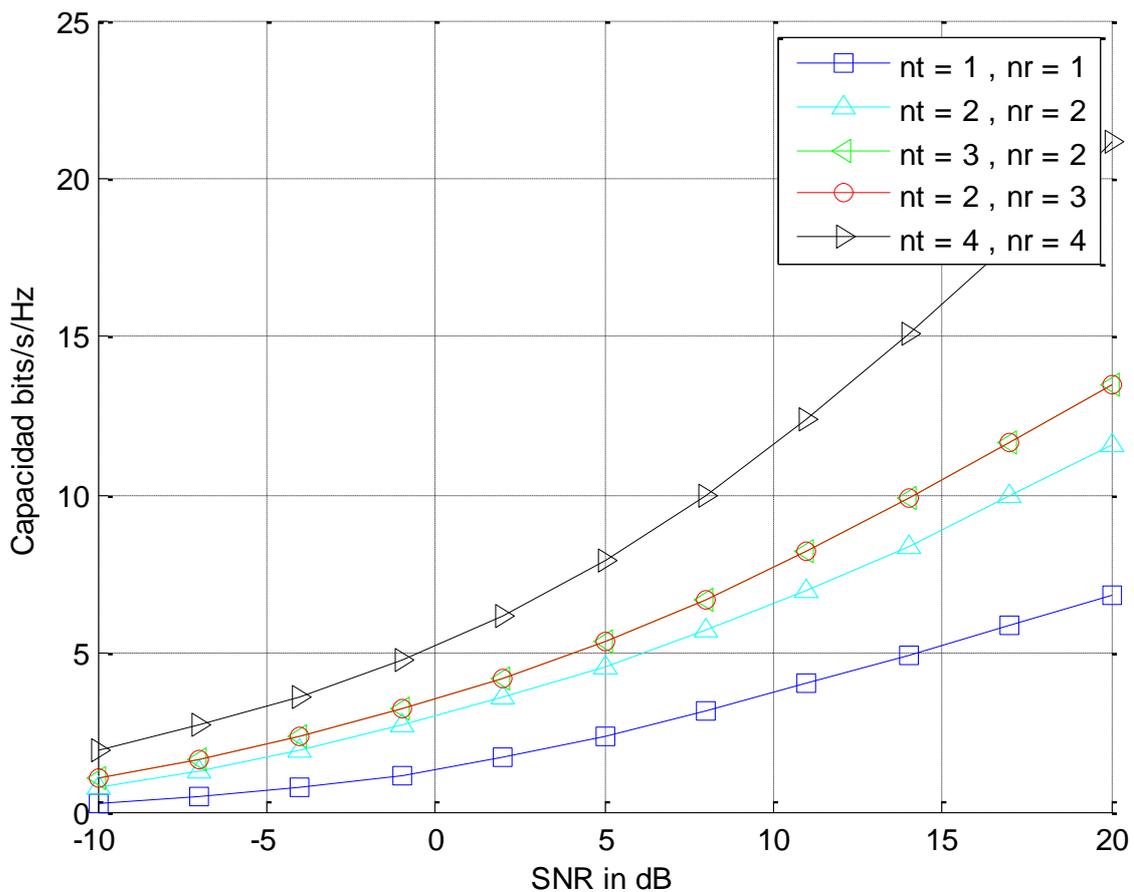


Figura 19: Figura demostrativa de la Capacidad de Canal de los Sistemas MIMO

En esta gráfica (**Figura 19**) básicamente, nos muestra que a mayor cantidad de antenas transmisoras y receptoras, obtenemos una mayor capacidad, claro esta que a medida que aumenta la capacidad aumenta también la relación señal ruido. Por ejemplo: En la primera línea (de abajo hacia arriba), la cual es de color azul, observamos que se tiene un arreglo de 4 antenas receptoras y 4 transmisoras y al simular la capacidad su capacidad es de 22.83 bits/s/Hz cuando esta a 20 dB de la relación señal ruido.

En la siguiente gráfica (Figura 20) observaremos que en el lado del transmisor se encuentran ubicadas una serie de antenas, al inicio se muestra 1 y se van variando hasta llegar a 4 y se observa la variación de la capacidad a medida que se va incrementando, notándose que su punto mayor lo alcanza al tener 4 antenas.

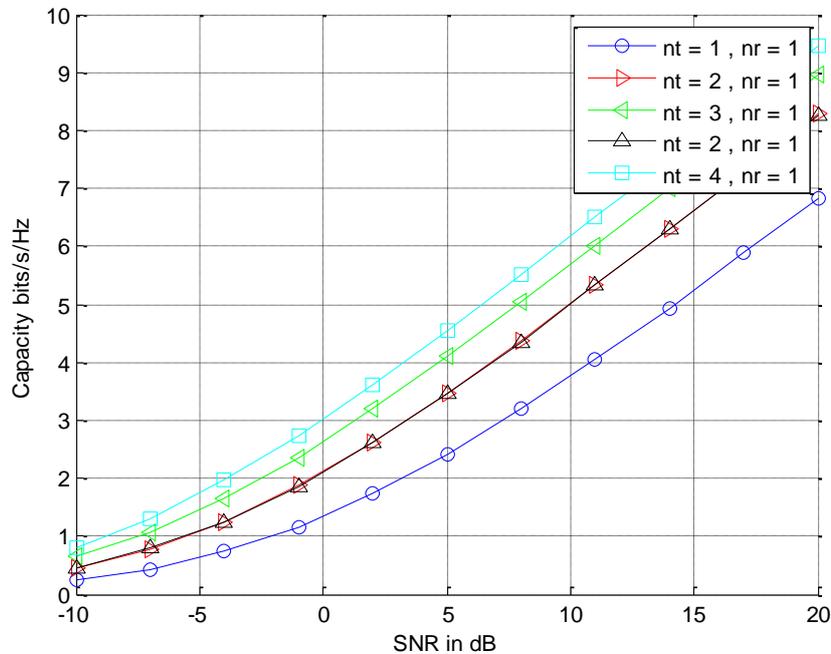


Figura 20: Capacidad del sistema MISO

A continuación, la Figura 21 nos muestra que a pesar de tener una serie de antenas receptoras en este caso en un punto de 4, en la razón señal ruido de 20 dB, su capacidad es de 9.38 bits/s/Hz

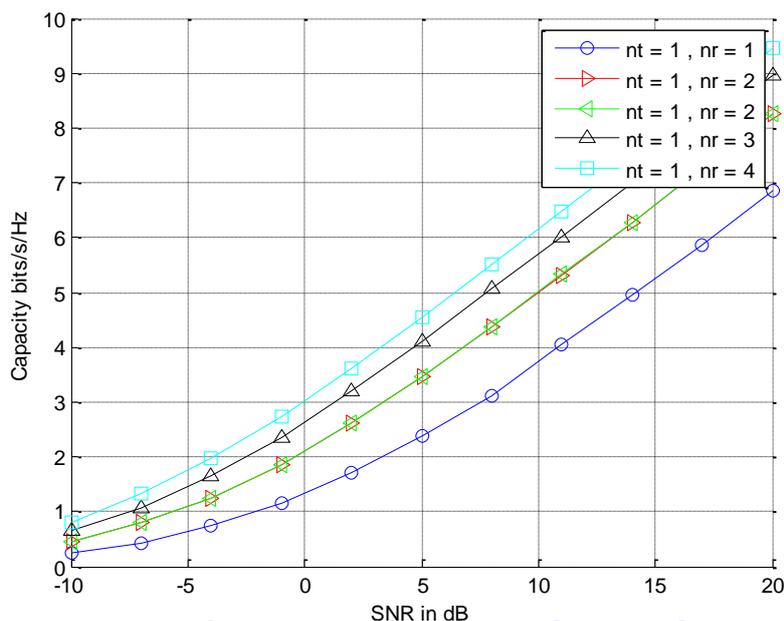


Figura 21: Capacidad de Canal de los Sistemas SIMO

A continuación la grafica del sistema SISO:

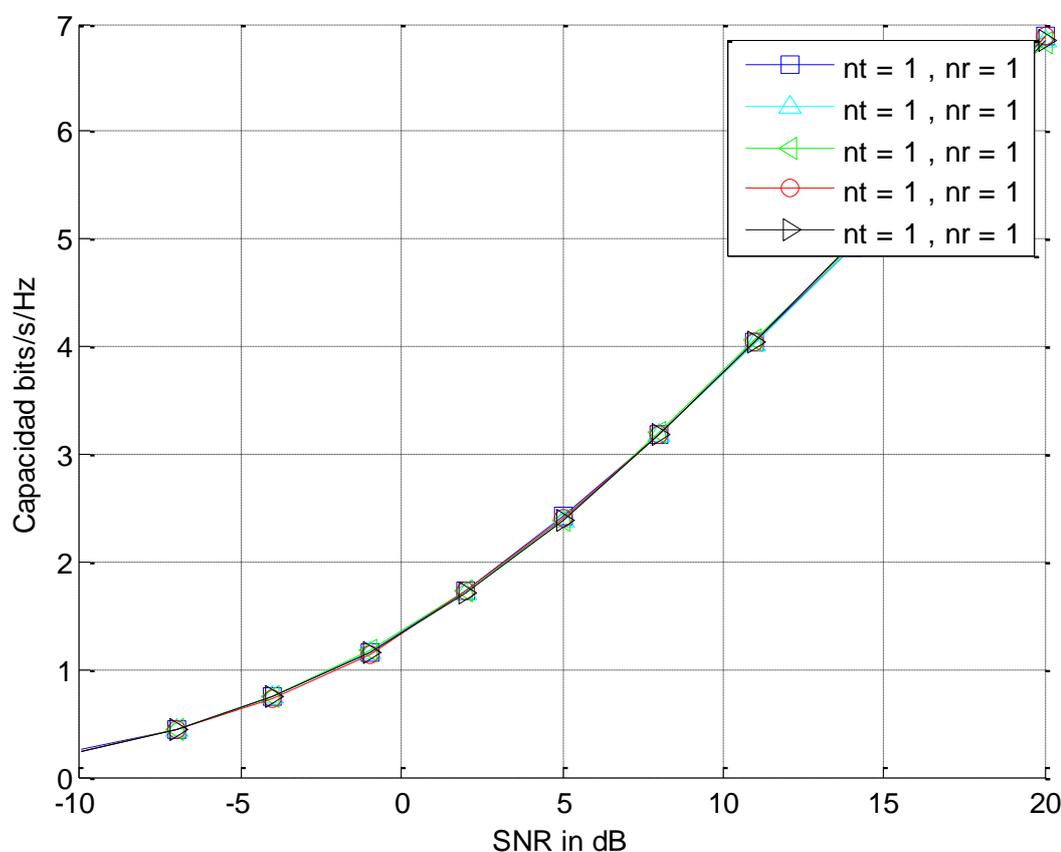


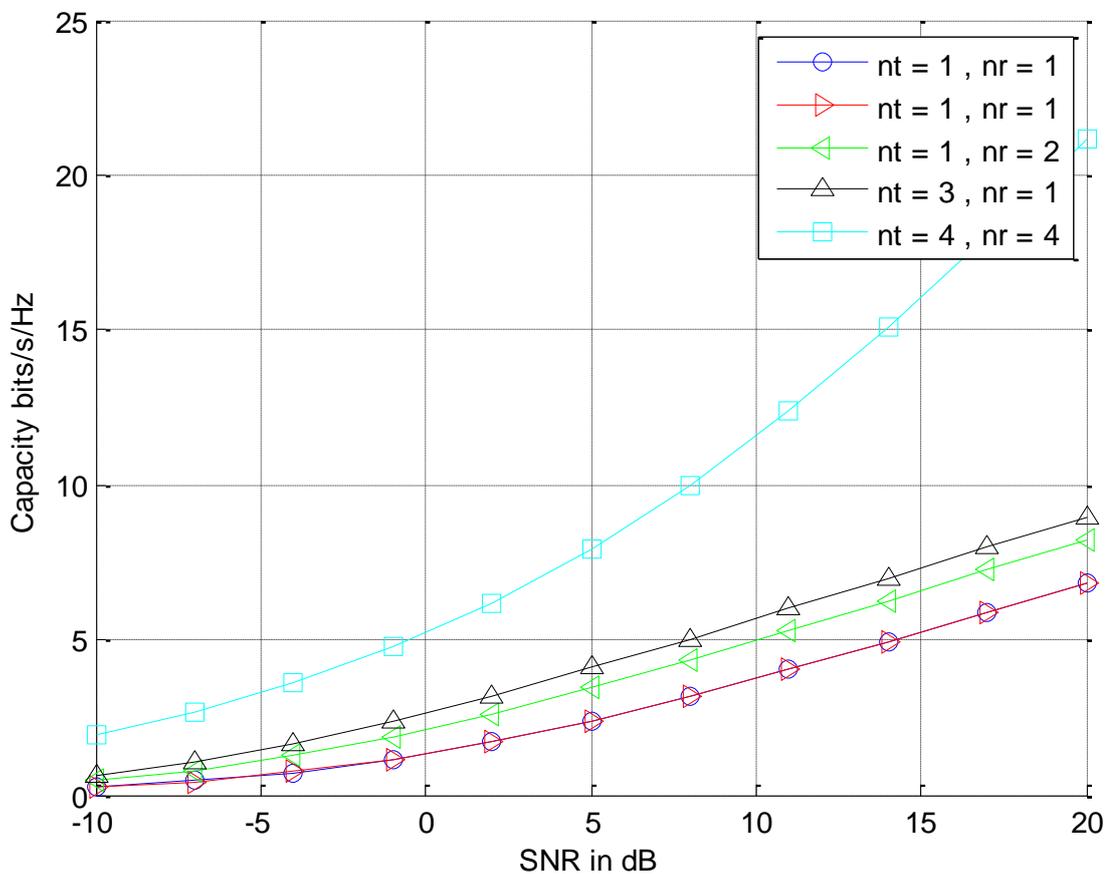
Figura 22: Capacidad de Canal de los Sistemas SISO

A como se conoce SISO se forma de una entrada y una salida, es esta grafica (**Figura 22**) podemos observar que entre mayor sea la relación señal ruido, tiende a incrementar la capacidad en este caso dando un resultado de 6.83 bits/s/Hz.

### 3.1.3 Comparación de los resultados obtenidos por simulación

Una vez que hemos visto las diferentes simulaciones y resultados para cada uno de los sistemas, podemos ver la gran diferencia y ventaja de los sistemas MIMO sobre sus antecesores, dado que al simular la grafica para 20dB SNR como máximo el sistema MIMO es el único que sobrepasa los 10 bits/s/Hz. Por lo que hemos corroborado que a mayor cantidad de antenas tanto transmisoras como receptoras, tenemos una mejor y mayor capacidad.

En la próxima gráfica (**Figura 23**) podremos apreciar mejor lo expresado anteriormente.



**Figura 23: Comparación de los sistemas SISO, SIMO, MISO & MIMO**

De abajo hacia arriba, las dos primeras líneas (color rojo y azul) muestran un sistema SISO, la línea verde muestra un sistema SIMO, la cuarta línea está definida para un sistema MISO y por último la línea celeste ejemplifica el sistema MIMO.

### 3.2 Simulación basada en mediciones de campo (Anteriormente realizadas)

Hemos observado la elaboración de diferentes simulaciones de manera ideal de la capacidad de los diferentes sistemas, por lo que ahora queremos mostrar la simulación elaborada por [12] y [13], que son mediciones de campo anteriormente elaboradas la cual puede ser apreciada a continuación y en donde muestra la capacidad frente a SNR.

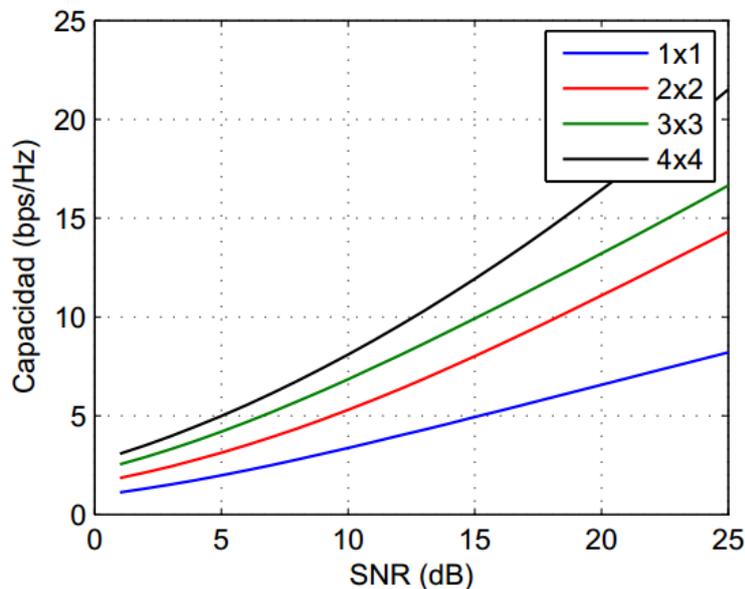


Figura 24: Capacidad frente a la SNR (Tomada de [12])

En dicha **Figura 24**, tomada del ejemplo elaborado por [12] se representa la capacidad para un valor de probabilidad acumulada del 10% o capacidad de outage obtenida de los distintos esquemas MIMO  $M_T \times M_R$  en función de la relación señal a ruido para una cadena receptora (SNR). Como se observa en dicha figura, al aumentar el número de antenas a cada lado del enlace radio se mejora la capacidad del sistema.

Otro de los ejemplos que hemos tomado en cuenta es el que se presenta en [13], en el cual a como dice el título toman en consideración la presencia y/o impacto del cuerpo humano para realizar la medición de la capacidad.

En el trabajo presentado en [13], llegan a la conclusión de que realizar una medición realista requiere de una exhaustiva campaña de medición en un ambiente real de operación y en el que para evitar dichas exhaustivas campañas se realiza una medición aproximada que combina una campaña de medición simple para una propagación de canal de doble-dirección con medidas de usuarios y las características de la antena las que pueden ser realizadas en una cámara anecoica (**Figura 25**). Dicho ejemplo fue realizado en un edificio de Ericsson AB para un escenario micro-celular indoor-outdoor en Kista, Suecia.



**Figura 25: Cámara Anecoica**

La respuesta del impulso de la doble-dirección es interpretado como una contribución de sumas de componentes de multitrayectoria (MPC), que se han caracterizado por sus direcciones de llegada y de salida así como sus retrasos.

El método de medición se basa en dos hechos:

- 1) La propagación del canal de doble-dirección describe solo la propagación de multitrayectoria misma y como consecuencia libre de cualquier influencia sobre las antenas.

- 2) El usuario (incluyendo su cabeza, mano, y torso) junto con el actual auricular (antenas, así como la carcasa) pueden ser interpretados como súper-antenas que puede ser caracterizada por su patrón de antena y frecuencia dependencia y que pesa y agrega los MPC.

Por el contrario una medida de canal de doble-dirección puede ser combinado con cualquier característica de medidas de súper-antenas para describir la combinación del efecto del canal, usuario y antena. Este particular permite una completa y reproducible comparación de diferentes arreglos de antenas en el ambiente de propagación elegido.

En este ejemplo [13], se estudian 3 diferentes tipos de espectros y configuración de terminales:

- Modo hablante (*tm*), que representa el escenario donde el usuario sostiene la terminal con la mano derecha en el oído
- Modo multimedia con el lado de la antena hacia debajo de las terminales (*mm*) y el modo multimedia con el lado de la antena hacia arriba de las terminales (*mmb*), representan el escenario donde el usuario sostiene la terminal en su mano derecha mientras ve la pantalla. El desempeño del individuo de las 4 antenas terminales puede diferir significativamente, dependiendo de la posición de la terminal con respecto a la mano. Por el contrario en cada modo, la terminal fue localizada en 3 posiciones relativas de compensación de 10 mm dentro de la mano.

Los anteriores son mostrados en la **Figura 26** (Fuente [Y]). En esta figura, muestra el resultado para la capacidad ergódica (que no es más que el valor esperado de esta según el canal), es decir, es la que representa la capacidad media del canal, es decir la velocidad de transmisión de datos que puede alcanzar un sistema MIMO utilizando un cierto ancho de banda.

Mientras que la capacidad outage da una idea de la fiabilidad operativa del sistema, indicando la velocidad de transmisión de datos mínima garantizada en un alto porcentaje de tiempo [14]) para un sistema 4x8 para los 3 diferentes modelos como es el caso de tm, mm y mmb y donde muestra que la diferencia fue entre 2.2 y 0.7 bits/s/Hz para una SNR menor de 20dB.

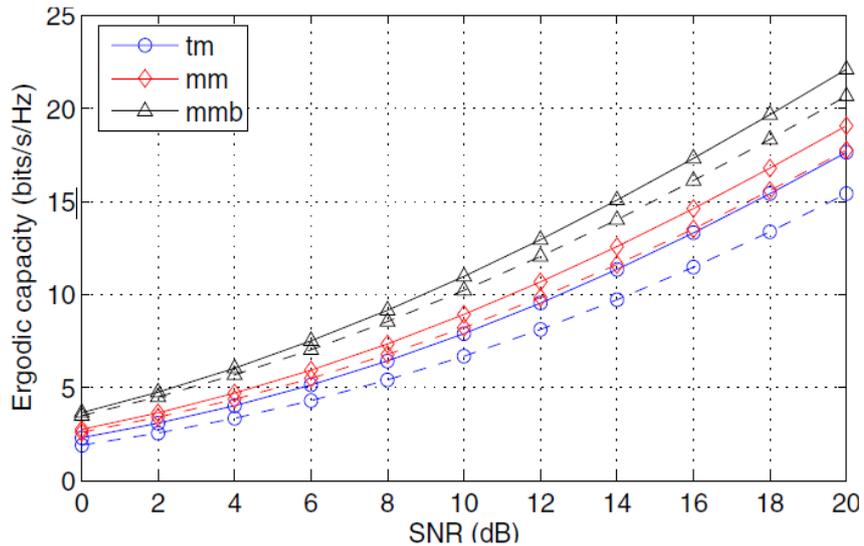


Figura 26: Capacidad Ergódica Vs. SNR

Este experimento fue diseñado para un ambiente como se muestra en la Figura 27 (Fuente [13]), para la cual MS es la estación móvil, BS es la estación base, para la cual se consideraron dos bandas de frecuencia 2530-255 MHz y 2610-2690 MHz, debido a que se consideran las licencias del espectro disponibles.

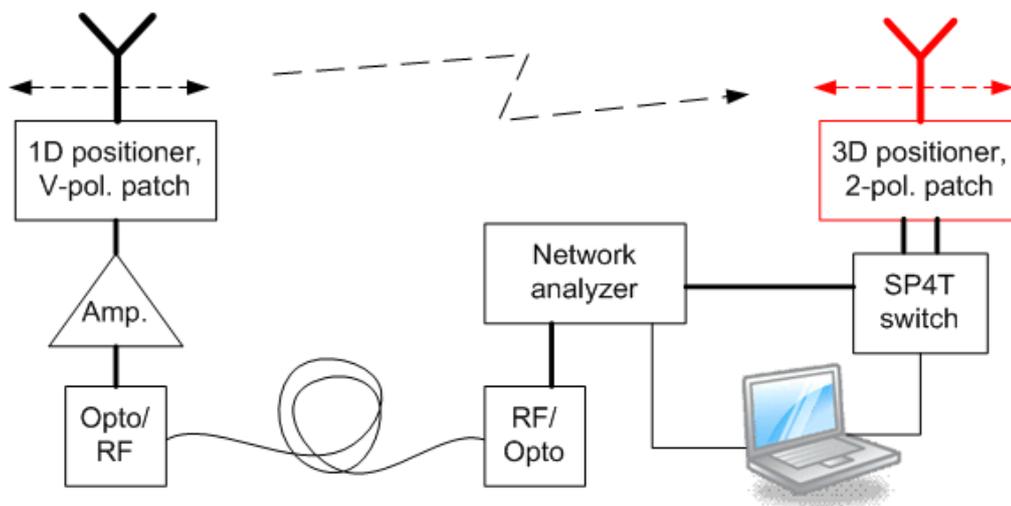


Figura 27: Mapa de donde fueron tomadas las mediciones

En esta **Figura 27**, la BS, esta situada sobre una pasarela en una calle entre dos casas, mientras que la MS fue posicionada en un laboratorio donde las ventanas estaban orientadas hacia la calle. Para habilitar las mediciones de MIMO, en la posición de la BS, un robot lineal fue utilizado para examinar la antena en 8 posiciones separadas por 4 cm. La antena fue ajustada en una posición verticalmente polarizada, con 9 dB de ganancia y alrededor de  $60^\circ$  de amplitud de rayo.

En el caso de la MS, se siguieron dos pasos para obtener dos tipos diferentes de medidas:

1. Primeramente, un canal de medición de sonido de arreglo-virtual fue establecido para desempeñar una caracterización de doble-dirección del canal, usando un robot 3D posicionado en la MS (Figura 28). El robot mueve la antena para formar un arreglo cuadrado sintético de  $8 \times 8$  con 4 cm elementos de distancia, rotados en pasos de  $90^\circ$  a 4 direcciones.



**Figura 28:** Configuración de las mediciones de caracterización del canal con el 3D posicionamiento del robot y la antena de la sonda en el lado Rx. (Fuente [13])

En el canal directo las mediciones de la antena de la sonda se intercambiaron por el fantasma y el 4 - terminal de antena.

2. Secundamente, las medidas directas de las funciones de transferencia fueron hechas con el robot e intercambiando la examinación de la antena. La medición de la SNR fue mayor de 50dB. Se observó que los componentes como variante del tiempo dado a los árboles azotados por el viento fue suprimido a -20 dB vs los componentes estacionarios.

### **3.3 Comparación entre simulación basada en mediciones de campo & Aspectos Teóricos**

Dado que los sistemas de comunicaciones MIMO constan del uso de múltiples antenas transmisoras y múltiples antenas receptoras, creando múltiples canales paralelos y haciendo que las señales transmitidas se combinen para obtener una mayor calidad y disminuir la tasa de error de bits y tienen como objetivo aumentar la capacidad del bucle de radio y obtener enormes eficiencias espectrales sin aumentar el ancho de banda, que es lo que nos muestra la simulación de la gráfica de Capacidad frente a la SNR, en donde podemos apreciar que al añadir varias antenas tanto en transmisor como receptor se incrementa la capacidad total del sistema y el aumento de esta capacidad se expande conforme más independientes sean las señales recibidas y que a su vez el equipo se encuentre despejado.

## CAPITULO 4: APLICACIONES & CASOS DE ESTUDIO

El siguiente capítulo está basado en los estándares que han tenido mayor relevancia en el mercado y que actualmente están haciendo uso de las ventajas que ofrecen los sistemas de múltiples antenas.

### 4.1 WLAN – IEEE 802.11n

#### 4.1.1 Aspectos Teóricos

El desarrollo del 802.11n comenzó en el año 2003, cuando el IEEE formó el TGn (Task Group N) para comenzar a trabajar sobre la especificación. Inicialmente, la meta fue dar velocidades de al menos 100 Mbps, esencialmente el doble de la velocidad máxima existente para las especificaciones 802.11a/g que es de 54 Mbps.

Compañías de hardware y networking hicieron múltiples propuestas, sumando un total de 61 propuestas que fueron sometidos al IEEE. Para febrero del 2005, estas fueron reducidas a dos, ambas con fuerte apoyo de varias compañías.

Una de las propuestas fue hecha por el grupo **WWiSE** (World Wide Spectrum Efficiency) el cual comprendía compañías como Airgo Network, Broadcom, Motorola y Texas Instruments. Esta propuesta sugería el uso de canales con similar ancho de banda (20 MHz) para las redes existentes 11b/g además del uso de múltiples antenas de transmisión y recepción, o MIMO, para lograr velocidades alrededor de los 135 Mbps en condiciones reales.

La otra propuesta fue hecha por el grupo TGnSync que estaba constituido por Atheros Communications, Intel, Philips, Sony, entre otros. La propuesta sugería doblar el ancho de banda a 40 MHz, en esencia el doble de velocidad. Además los dispositivos de TGnSync permitían técnicas de procesamiento sofisticados para transmitir datos a velocidades sobre los 315 Mbps.

Las dos propuestas competían por el estándar 802.11n. Ambas ofrecían medidas para comunicaciones MIMO con cuatro antenas para transmisión y cuatro para recepción. Ambas soportaban un modo opcional de 40 MHz de ancho de banda. Las dos propuestas también diferían en áreas tales como codificación espacio-tiempo, aproximación de la estimación del canal.

Debido a que cada propuesta tenía un importante apoyo, ninguna había sido capaz de obtener el voto mayoritario requerido para la aprobación hacia el estándar IEEE 802.11n. Finalmente en julio del 2005 un grupo constituido por los miembros de ambas propuestas se pusieron de acuerdo para formar un grupo de propuesta común, el cual conformó el TGn workgroup en enero del 2006. Esta nueva oferta fue referida como TGn Joint proposal, que combinó los beneficios de las dos anteriores y formó la base del actual borrador para el estándar 802.11n, el draft 2.0.

Se consideraron escenarios de interiores como oficinas grandes y pequeñas, casas residenciales y espacios abiertos para **LoS** (Line-of-Sight) y **NLoS** (Non-Line-of-Sight). El modelo especifica hasta 6 entornos, es un modelo físico que usa una aproximación estocástica y no geométrica.

A continuación una tabla resumen de los actuales estándares disponibles para WLAN.

| Estándar         | 802.11 a | 802.11 b   | 802.11 g           | 802.11 n           |
|------------------|----------|------------|--------------------|--------------------|
| Año              | 1999     | 1999       | 2003               | 2009               |
| Velocidad (Mbps) | 54       | 11         | 54                 | Hasta 600          |
| Modulación       | OFDM     | DSSS – CCK | DSSS – CCK<br>OFDM | DSSS – CCK<br>OFDM |
| Banda (GHz)      | 5        | 2.4        | 2.4                | 2.4 / 5            |
| Flujo de Datos   | 1        | 1          | 1                  | 1 a 4              |
| Canal (MHz)      | 20       | 20         | 20                 | 20 a 40            |

Tabla 1: Estándares WLAN

#### 4.1.2 Aspectos Técnicos

Además de proporcionar mayores velocidades de bits (como se hizo con 802.11a, b, g), 802.11n hace un cambio drástico en el formato básico de la trama que es usado por los dispositivos en los suplementos a, b, g para comunicarse unos con otros.

La capa física del estándar 802.11n se desarrolló basándose en la estructura OFDM de 802.11a. Esta elección se hizo ya que OFDM es mucho más adecuada para entornos de fading ante posibles interferencias, debido a que modula el conjunto de datos en las diferentes subportadoras y por tanto sólo se verían afectadas algunas subportadoras, las cuales luego pueden ser recuperadas mediante algún método de corrección de errores. La utilización de OFDM resulta imprescindible si tenemos en cuenta que es tolerante con los errores de sincronización de tiempo, muy común en sistemas de intercambio elevadas tasas de datos.

En 802.11n, se mantiene 4ms de tiempo de símbolo que poseía 802.11a, pero el número de subportadoras para cada canal de 20 MHz aumenta a 52, incrementando la tasa de datos máxima de 54 a 65 Mbps para una transmisión radio. Dado que 802.11n también permite la utilización de hasta 8 tasas de transmisión distintas y un número de transmisores a 4, tenemos hasta 32 tasas de datos disponibles.

Entre los cambios incorporados se encuentran:

- **Mejora de la eficiencia a nivel MAC:** Esta eficiencia se logra gracias a la implementación de la agregación de paquetes y mejoras en el protocolo de Block Ack. También se incluyen mejoras como el protocolo de dirección inversa que proporciona una mejora de rendimiento bajo ciertos tipos tráficos y la utilización de un espacio inter-trama más pequeño (RIFS por sus siglas en inglés)
- **Robustez:** Esta mejora se consigue mediante el incremento de la

diversidad espacial dado por la utilización de múltiples antenas. Otras opciones que nos brindan robustez son el uso de la codificación **STBC** (Space-Time Block Coding) y un nuevo código de canal **LDPC** (Low Density Parity Code).

Debido al gran crecimiento de la utilización de dispositivos móviles, se introduce una nueva técnica de acceso al canal llamado **PSMP** (Power-Save Multi-Poll), la cual permite soportar eficientemente un mayor número de estaciones.

- **Compatibilidad:** 802.11n tiene una serie de mecanismos que proveen compatibilidad con 802.11 a, b y g, permitiendo a estos dispositivos comprender la información necesaria para dejar a los dispositivos 802.11n operar en la misma área.

Por mucho tiempo, 802.11n necesitará operar en la presencia de 802.11 a, b y g. Este modo de operación mixto continuará hasta que todos los dispositivos en un área hayan sido mejorados o reemplazados con elementos 802.11n. El mecanismo de protección de modo mixto para 802.11n es completamente similar al mecanismo de protección de 802.11g.

802.11n transmite una señal que no puede ser decodificado por dispositivos construidos en un estándar anterior. Para evitar caer en presencia de interferencia masiva y colisiones, 802.11n opera en un modo mixto para transmitir un campo de preámbulo de radio y señal que puede ser decodificado por los radios 802.11 a y 802. Esto provee suficiente información a los radios a fin de poder indicar que hay otra transmisión en el aire y el tiempo que durará la misma.

Tras el campo de preámbulo y señal, el dispositivo 802.11n envía la información restante usando múltiples flujos espaciales, incluyendo el campo de preámbulo y señal.

- **Confiabilidad:** Un mayor SNR en el enlace de radio (mediante el uso de MIMO) se traduce directamente a una comunicación más confiable, a menudo a mayor velocidad de transmisión. Un alto SNR significa que es necesaria una mayor interferencia para corromper una transmisión, por tanto se puede soportar una mayor densidad de clientes.
- **Cobertura:** El uso de múltiples flujos espaciales provisto por la tecnología MIMO quiere decir que habrá pocos puntos muertos en un área de cobertura. Las áreas que anteriormente sufrían de múltiples interferencias destructivas ahora hacen uso de ese mismo efecto múltiple para proveer una comunicación robusta.
- **Rendimiento:** La eficiencia mejorada en 802.11n proporciona una mayor transferencia a altas velocidades de manera eficaz para las aplicaciones actuales. Incluso en modo mixto con el despliegue de dispositivos 802.11, 802.11n proveerá un mayor rendimiento efectivo, aunque significativamente menos que el modo greenfield.

En la **Figura 29** se ilustra un ejemplo de las posibles aplicaciones del 802.11n.

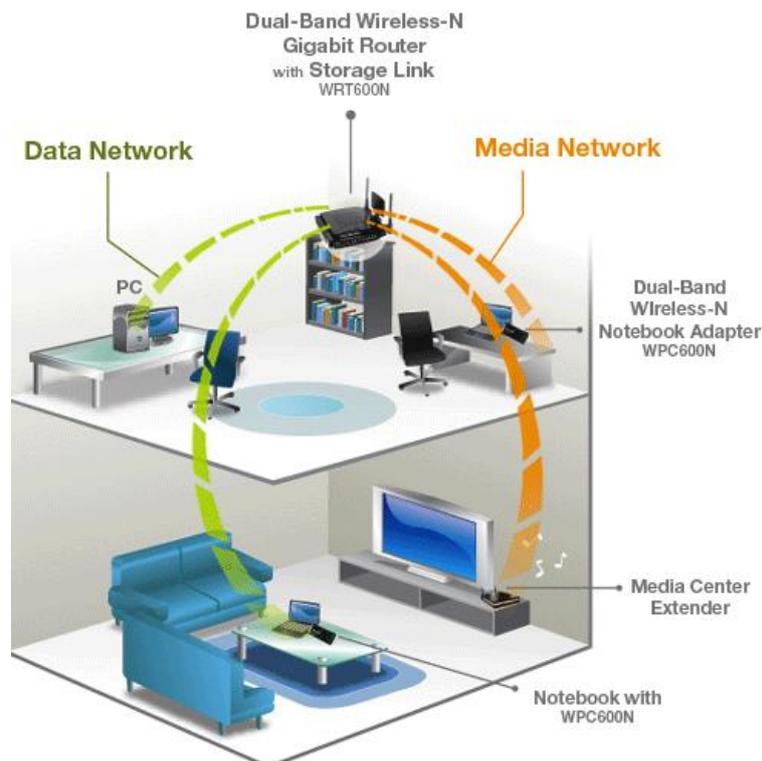


Figura 29: Aplicaciones del Estándar IEEE 802.11n (Fuente [19])

## 4.2 WIMAX –802.16-2004 (IEEE 802.16d) & 802.16- 2005 (IEEE 802.16e)

El estándar WIMAX esta dividido en el área dedicada a servicio Fijo y otro a servicio Móvil, sin embargo ambas comparten la mayor parte de técnicas utilizadas.

### 4.2.1 Aspectos Teóricos

WIMAX es un estándar de comunicación por radio, promovido por el IEEE, el cual está diseñado para proveer accesos vía radio de alta capacidad para distancias aproximadas entre 50 Km y tasas de transmisión de 70 Mbps. Esta tecnología transforma las señales de voz y datos en ondas de radio, las mismas que se transmiten por el aire a través de una red de estaciones base hasta llegar a una antena receptora ubicada en el exterior de una edificación.

El término WIMAX ha sido usado para describir sistemas inalámbricos que están basados en los perfiles de certificación WIMAX del Estándar de Interfaz de Aire IEEE 802.16-2004 (IEEE 802.16d) WIMAX “Fijo” y de IEEE 802.16-2005 (IEEE 802.16e) mejora móvil o WIMAX “Móvil”.

El Wimax Forum, conformado por un amplio conjunto de industrias, define diferentes perfiles de funcionamiento que reúnen un conjunto detallado de características del estándar. El cumplimiento de estos perfiles permitirá que los equipos sean compatibles con el estándar pero además garantizan la interoperabilidad con equipos de diferentes fabricantes.

### 4.2.2 Aspectos Técnicos

Este tipo de comunicaciones posee la característica dúplex, es decir transmisión y recepción en los dos extremos. Ambas comunicaciones al compartir el mismo medio necesitan establecer algún mecanismo para el control de acceso. Hay dos métodos principales: **FDD** (Frequency Division Duplex) basado en el reparto de la frecuencia y **TDD** (Time Division Duplex) basado en reparto temporal.

WIMAX permite ambas técnicas de transmisión. FDD se puede emplear en soluciones para bandas licenciadas y TDD para soluciones de bandas libres.

- **FDD:** se basa en la utilización de dos bandas diferentes de frecuencia para la transmisión, una para el envío y otra para la recepción. La desventaja de usar esta técnica es la necesidad de hacer uso de unos buenos filtros separadores de frecuencia, conocidos como duplexores.
- **TDD:** Esta técnica difiere de FDD porque hace uso de una única banda de frecuencia para el envío y recepción de la información, compartiendo los periodos de transmisión. Esto ocasiona que los retardos de transmisión limiten el tamaño de las celdas.

Una de las técnicas que utiliza la tecnología WIMAX es OFDM por su capacidad para gestionar los diferentes retardos que se producen en señales que padecen multitrayecto. Estos multitrayectos también pueden producir interferencia entre símbolos, provocado por los diferentes retardos, que hace que se mezclen símbolos consecutivos. La manera de solucionar esto es a través del uso de un periodo de guarda para cada símbolo OFDM.

Esta técnica no es totalmente infalible, presenta ciertas desventajas como la de ser más sensible que las técnicas tradicionales al desfase en frecuencia o desfase en la sincronización temporal. Es por ello que se requiere utilizar mecanismos de corrección de errores, que añaden bits adicionales en la transmisión, pero que hacen posible la corrección de dichos errores.

Otra de las técnicas es **OFDMA** también conocida como multiusuario OFDM está siendo considerada como un método de modulación y acceso múltiple para tecnologías inalámbricas como WIMAX. Se trata de una extensión de OFDM que es la técnica de multiplexación empleada por los sistemas inalámbricos 802.11a/g/n y 802.16a/d/e.

En los sistemas OFDM actuales, un único usuario puede transmitir sobre todas las subportadoras en cualquier momento y se hace uso de las técnicas de acceso múltiple por división de código o de tiempo para soportar múltiples usuarios. OFDMA en cambio permite a múltiples usuarios transmitir en diferentes subportadoras por cada símbolo OFDM. De esta manera se asegura que las subportadoras se asignan a los usuarios que ven en ellas buenas ganancias de canal.

En la **Tabla 2** se ilustra una pequeña reseña de la historia del estándar 802.16

| Estándar    | Año  | Banda de Frecuencia |
|-------------|------|---------------------|
| 802.16      | 2002 | 10-66 GHz           |
| 802.16a     | 2003 | 2-11GHz             |
| 802.16b     | 2003 | 5-6 GHz             |
| 802.16c     | 2003 | 10-66 GHz           |
| 802.16d     | 2003 | 2-11 GHz            |
| 802.16-2004 | 2004 | 2-66 GHz            |
| 802.16e     | 2005 | 2-11 GHz            |

**Tabla 2: Historia del Estándar 802.16**

#### 4.2.3 WMAX Fijo

Fue aprobado en junio del 2004, además este estándar sustituyó a la versión 802.16a. Este estándar opera en frecuencias de 2 a 11 Ghz, su velocidad de transferencia es de 70 Mbps, siendo su rendimiento real de 40 Mbps. La cobertura de radio es de aproximadamente 4 a 7 millas. Es una nueva tecnología de acceso inalámbrico fijo, es de gran utilidad para el acceso básico y de voz en aquellos lugares donde se carece de cualquier otra tecnología que presta el servicio de Internet.

Este estándar es una solución viable para el backhaul inalámbrico y para las redes celulares, en particular si se emplea el espectro con licencia. Asimismo esta tecnología ofrece una alternativa inalámbrica al módem por cable y a **DSL** (Digital Subscriber Line), porque 802.16-2004 es exclusivamente para el acceso fijo, es decir, Internet en hogares de banda ancha de manera inalámbrica.

El estándar 802.16-2004 también puede soportar voz sobre IP. Después de la aprobación del estándar 802.16-2004 se encontraron algunos errores que debieron corregirse, lo que dio paso a la creación de un nuevo estándar denominado 802.16e. Posee modulación OFDM que es menos compleja que la modulación OFDMA con lo que el despliegue es más rápido y es menos costoso. Se carece de mucha flexibilidad al momento de controlar el ancho de banda. Soporta las técnicas de acceso al medio: TDD y FDD. Además este estándar está diseñado para soportar las denominadas Smart Antenas.

Una de las principales características de WIMAX Fijo a nivel físico es que permite técnicas de duplexación como TDD, FDD en la BS, y **HFDD** (Half-Frequency Division Duplex) en la **SS** (Subscriber Station).

En la **Figura 30** se observa un ejemplo del funcionamiento del estándar IEEE 802.16d (WIMAX Fijo).



**Figura 30: Funcionamiento del estándar IEEE 802.16d (Fuente: [15])**

El estándar IEEE 802.16d-2004 se encuentra orientado a conexión, de tal forma que cada estación suscriptor tiene asignada por la estación base un único **CID** (Identificador de Conexión). Además, se proporciona seguridad empleando el protocolo **PKM** (Privacy Key Management) para la gestión de claves.

En cuanto a la capa MAC, es de destacar que este estándar puede ser usado como portador de **ATM** (Asynchronous Transfer Mode), Ethernet e IP, siendo diseñado para acomodar fácilmente futuros protocolos aún no implementados. Se tiene especial interés en proporcionar distintas QoS a capas superiores y tener la máxima eficiencia de ancho de banda en el UL, asignando slots de frecuencia dinámicamente en función de peticiones de ancho de banda.

La principal aplicación de este estándar es competir con los proveedores de cable o DSL para proporcionar servicio de voz (sobre IP) y banda ancha en aquellas regiones donde no es rentable emplear otra tecnología de acceso, pues se tiene un gran radio de cobertura.

#### 4.2.4 WIMAX móvil

Es una solución inalámbrica de banda ancha que hace posible la convergencia de redes móviles y fijas de banda ancha a través de una tecnología de acceso de radio de banda ancha para un área extensa en común y una arquitectura flexible de red. El WIMAX móvil de interfaz de aire adopta OFDMA para mejorar el desempeño de multitrayectoria en ambientes sin línea de vista.

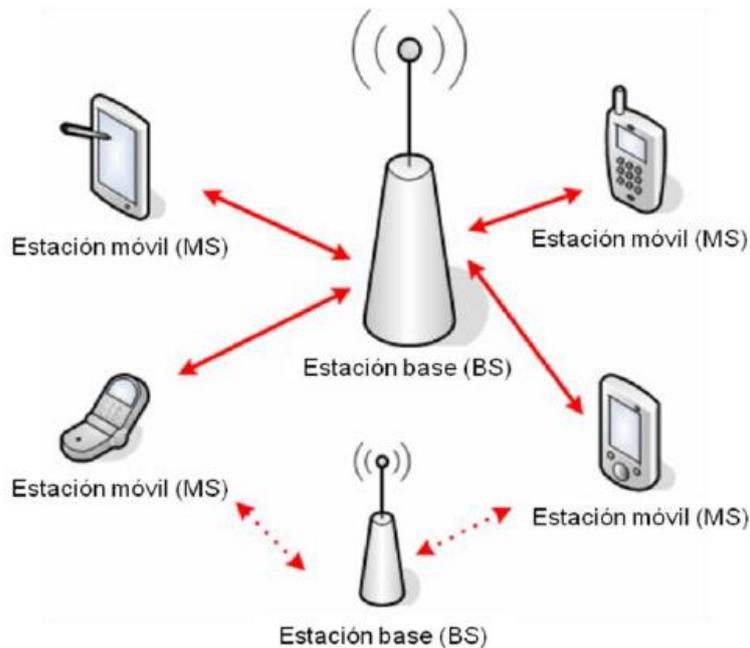
Los sistemas con WIMAX móvil ofrecen escalabilidad tanto en tecnología de acceso de radio como en arquitectura de red. Algunas de las características que soporta WIMAX móvil son:

En la red WIMAX la cobertura de un área geográfica se divide en una serie de zonas solapadas llamadas celdas, proporcionando cobertura cada una de ellas para los usuarios que se encuentren dentro. Al moverse un usuario, se desplazará de celda, siendo traspasada la conexión de manera transparente al usuario.

- **Altas velocidades de datos:** La inclusión de técnicas de antena MIMO junto con esquemas de subcanalización, modulación y codificación avanzada habilitan a la tecnología WIMAX móvil para soportar tasas de downlink pico de 63 Mbps por sector y tasas de uplink pico de 28 Mbps por sector en un canal de 10MHz.
- **Escalabilidad:** Esta tecnología está diseñada para ser capaz de escalar y trabajar en diferentes canalizaciones de 1.25 a 20 MHz para cumplir con una variedad de requerimientos universales como esfuerzos para llevar a cabo una armonización del espectro.
- **Seguridad:** Entre los aspectos de seguridad provistos por WIMAX móvil se encuentran: **EAP** (Extensible Authentication Protocol) basado en autenticación, **AES-CCM** (Advanced Encryption Standard using Counter Cipher Mode) basado en encriptación autenticada y **CMAC** (Counter-based Message Authentication Code) y **HMAC** (Hash-based Message Authentication Code) basado en esquemas de protección de mensajes de control.
- **Movilidad:** Soporta esquemas de Handover o Handoff, lo que permite pasar de un área de cobertura a otra sin que se interrumpa la comunicación, optimizados con latencias menores que 50 mseg para garantizar aplicaciones en tiempo real como cumplir VoIP sin degradación.
- **Calidad de servicio:** Premisa fundamental en la arquitectura IEEE 802.16 MAC.

El impacto del estándar WIMAX Móvil ha sido mayor que el de WIMAX Fijo. La versión fija de WIMAX atrajo fundamentalmente a nuevas empresas o especialistas en comunicaciones fijas inalámbricas, mientras que la versión móvil sí parece despertar el interés de los grandes suministradores de tecnología para redes celulares debido a sus múltiples aplicaciones inherentes a la movilidad.

A continuación en la **Figura 31** se gráfica el funcionamiento del estándar 802.16e WIMAX Móvil.



**Figura 31: Funcionamiento del estándar IEEE 802.16e (Fuente: [15])**

### 4.3 3GPP

**3GPP** (3rd Generation Partnership Project) es el grupo encargado de la estandarización del **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System). Fue creado en Diciembre de 1998 con el principal objetivo de desarrollar las especificaciones técnicas de las redes móviles de tercera generación a partir del sistema existente y triunfante en ese momento: GSM.

El 3GPP actualiza una nueva versión de la norma UMTS casi todos los años, la primera fue al Rel 99, seguida del R4, R5, entre otros. El proceso de normalización adoptado por 3GPP, se basa en una planificación de anual.

La tecnología de acceso utilizada en UMTS es **WCDMA** (Wideband Code Division Multiple Access), creada por el 3GPP, permite soportar velocidades de descarga de hasta 2 Mbps, aunque la velocidad en la práctica solo alcanza los 768 Kbps, conveniente para un número reducido de aplicaciones.

Sin embargo, para la mayoría de los casos resulta insuficiente, motivo por el cual el 3GPP creó los Release 5 y 6 contenidas en **HSPA** (High-Speed Packet Access), en el cual se introduce una mejora sustancial en la tecnología de acceso WCDMA.

La tecnología HSPA contiene los estándares **HSDPA** (High Speed Downlink Packet Access) o Release 5 y **HSUPA** (High Speed Uplink Packet Access) o Release 6, los cuales se implementan en la red móvil típicamente en forma secuencial, y se mejora en primer lugar la velocidad teórica de descarga a 14 Mbps con HSDPA y luego la de subida a 5 Mbps con HSUPA.

En la siguiente tabla haremos un resumen de cada una de las versiones de 3GPP:

| Release | Año  | Descripción  |
|---------|------|--|
| Rel 99  | 2000 | Son las primeras normas del sistema UMTS, que fueron incluidas por el 3GPP en abril del año 1999 y constituyen la base de la mayoría de los sistemas UMTS desplegados comercialmente en la actualidad. Soporte para las redes de radio GSM/GPRS/EDGE/WCDMA. Trabajando con un espectro más eficiente y mejorando los servicios de voz y datos por la introducción de 5 MHz de portadora para UMTS. |
| Rel 4   | 2001 | Proporciona soporte a mensajería multimedia, interconexión eficiente de la infraestructura del core de la red sobre backbone de la red IP.   |
| Rel 5   | 2002 | Contiene eficiencias de espectro ampliamente superiores, y ventajas de performance y funcionalidad a través del canal HSDPA , el <b>IMS</b> (IP Multimedia Subsystem), e IP <b>UTRAN</b> (UMTS Terrestrial Radio Access Network)   |

|       |      |   |
|-------|------|---|
|       |      | La introducción del transporte IP en la UTRAN les ofrece a los operadores el potencial de evolucionar la arquitectura UTRAN desde uno de los enlaces punto a punto utilizando TDM o ATM a otra que utilice conectividad IP de banda ancha. Esto llevará a mayores eficiencias y menores costos de las redes.  |
| Rel 6 | 2004 | Introdujo a UMTS el HSUPA, <b>MBMS</b> (Multimedia Broadcast Multicast Service), es un servicio de radiodifusión que se pueden ofrecer a través de GSM y UMTS   |
| Rel 7 | 2007 | <p>Se centró en metas como incrementar la capacidad y disminuir el retardo. En este sentido, HSPA aspira a lograr una tasa de transferencia máxima teórica del orden de 40 Mbps de bajada y 11 Mbps de subida. En cuanto a los tiempos de respuesta, se espera reducir a la mitad los mismos. En concreto se espera lograr un retardo máximo de 50 milisegundos y un tiempo máximo de establecimiento de conexión de datos de 500 milisegundose.</p> <p>También se centró en el desarrollo de la red <b>HSPA+</b> (High Speed Packet Access Evolution), una mejora en el ancho de banda de los sistemas GSM EDGE llamada EDGE Evolution, el protocolo de alta velocidad <b>SIM</b> (Subscriber Identity Module) y el protocolo de comunicación sin contacto <b>NFC</b> (Near Field Communication), que permitió a los operadores ofrecer servicios como por ejemplo el pago a través del móvil <b>MP</b> (Mobile Payments).</p> |
| Rel 8 | 2008 | Aparece la primera versión de red LTE así como la red All-IP o <b>SAE</b> (System Architecture Evolution). Aparecen también las nuevas interfaces de radio OFDMA, <b>FDE</b> (Fault Detection and Exclusion) y MIMO que no serán compatibles con las redes basadas en CDMA.   |

|        |      |  |
|--------|------|--|
| Rel 9  | 2009 | Mejoras de la red SAE, aparición del WIMAX y compatibilidad entre redes LTE y UMTS. Se sigue con el desarrollo del Dual-Cell HSDPA con MIMO, y aparece el Dual-Cell HSUPA. |
| Rel 10 | 2011 | Aparece el LTE avanzado LTE-Advanced cumpliendo los requisitos del IMT Advanced 4G. Esta nueva especificación es compatible con el LTE desarrollado en la versión 8.       |
| Rel 11 | 2012 | Interconexión IP de servicios avanzado, interconexión en la capa de servicio entre operadores nacionales y proveedores de aplicaciones.                                    |

Tabla 3: Versiones del 3GPP

La Tecnología MIMO comienza a ser usado por 3GPP desde la versión Release 7, por lo cual evaluaremos con más detalles cada una de las versiones que le siguieron.

#### 4.3.1 HSPA+ (Release 7)

El release 7 comprende una mejora aun más significativa respecto a las funcionalidades de transmisión de paquetes en WCDMA. Esta mejora se conoce como HSPA+ y consiste en la introducción de nuevas características, como MIMO, y otras muchas pequeñas mejoras que representan un incremento considerable en rendimiento y capacidad.

A continuación un resumen de las principales técnicas de HSPA+:

- **Modulaciones:** de 64QAM en sentido descendente y 16QAM en ascendente, permitiendo el envío de un mayor número de bits por símbolo. Para esto es necesario además mejorar la relación señal a ruido del sistema mediante nuevas técnicas de ecualización del receptor.

- **MIMO:** es una de las principales novedades en Release 7, introducido para incrementar las tasas de transmisión de pico mediante varios flujos. Los esquemas MIMO se diseñan para explotar ciertas propiedades en el entorno de radio propagación, obteniendo altas tasas de transmisión mediante el uso de varios flujos en paralelo. Sin embargo, para conseguir ese objetivo, se necesitan SNR altas en el receptor. Por tanto, la multiplexión espacial solamente se aplica en pequeñas celdas, o cerca de la estación base.

En las situaciones en las que no puede alcanzarse alta SNR, las antenas múltiples de un UE (Terminal del Usuario) pueden usarse para alcanzar diversidad en recepción. En cualquier caso, en los bordes de la celda se alcanzarán tasas altas, comparadas con las de un UE con una única antena.

- **CPC** (Conectividad de Paquetes Continua) para optimizar los consumos de los usuarios y minimizar el número de usuarios simultáneos cuando existe una cierta inactividad en la conexión, como por ejemplo durante el servicio de VoIP cuando no se está “hablando”, no existe transferencia de información. En este caso, se desconecta los módems de los terminales, o bien, se reduce la interferencia del canal de subida creada por los canales de control del sistema.
- **Doble Portadora:** Consiste en utilizar dos portadoras adyacentes de 5 MHz para lograr mayores velocidades de transmisión y mejores utilizaciones de los recursos disponibles.

El esquema usado para HSPA+ se conoce como Dual-Stream Transmit Adaptive Arrays (**D-TxAA**), el cual es un esquema con precodificación en el transmisor. En HSPA+ se transmiten dos flujos de datos. Cada flujo es pasado por la misma cadena de procesado en capa física en términos de codificación, ensanchamiento y modulación.

Incluso si sólo se transmite un único flujo, puede ser beneficioso explotar todas las antenas transmisoras usando diversidad en transmisión (beamforming). Los algoritmos de precodificación intentan predistorcionar la señal tal que los dos flujos transmitidos sean ortogonales en el receptor. Esto reduce la interferencia entre los dos flujos y disminuye la carga de procesado.

En La **Figura 32** se muestra la evolución de HSPA hasta llegar al release 7 conocido como HSPA+



Figura 32: Evolución de HSPA

## 4.3.2 LTE

### 4.3.2.1 Según el release 8

LTE es también conocida como evolución a largo plazo de UMTS o Acceso de radio terrestre por UMTS, forma parte de la versión 8 de las especificaciones del 3GPP. El objetivo de LTE es proporcionar un acceso de radio capaz de alcanzar velocidades de tráfico de hasta 100Mbps en Downlink y 50Mbps en Uplink. Esta tecnología opera en las mismas frecuencias que UMTS con BW variables de 20Mbps. Además ofrecerá menores tiempos de latencia lo que hace reducir los tiempos de acceso a un servicio y la respuesta de la red a cualquier solicitud.

En el aspecto económico, LTE incluye costos de despliegue y puesta en marcha del servicio. Los costos de implementación, incluye la migración de las redes UMTS a los nuevos requerimientos, ya que estos cambios no implican la red de radio sino el CORE de la red. Para esto el grupo de trabajo del 3GPP denominado SAE, trata de encontrar la solución óptima de red capaz de soportar estos cambios.

- **Nuevos métodos de transmisión para LTE**

3GPP se ha dedicado a buscar nuevos métodos de transmisión y modelos de arquitectura. LTE no está basado en WCDMA al igual que UMTS, en el Downlink el método de transmisión escogido es OFDMA. OFDMA es también utilizado en tecnologías como Wimax o DVB-T. OFDMA ofrece una robusta transmisión de datos con una buena eficiencia espectral.

En el Uplink el método usado por LTE es el **SC-FDMA** (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) que fue seleccionado por sus favorables características de señal. Las señales SC-FDMA presentan menores factores de cresta que las OFDMA y ello redundaba en un más sencillo desarrollo de la etapa amplificadora de los móviles.

El empleo de antenas múltiples, conocido como MIMO es otra característica importante de LTE. Sobre todo el uso de dos antenas de transmisión y recepción en la estación base, en los móviles cobra especial relevancia. En un sistema MIMO, las antenas de transmisión disponibles transmiten simultáneamente cadenas de datos independientes al mismo recurso de radio, pudiendo pertenecer al mismo usuario o a otro. Los sistemas MIMO ofrecen tablas de transmisión de datos considerablemente superiores y son, por tanto, un componente fundamental de LTE.

Además de los métodos de transmisión física, la arquitectura del protocolo LTE ha sido completamente reformada. El objetivo es conseguir una arquitectura menos compleja que la existente para UMTS. La estación LTE, que es conocida como **eNB** (Evolved Node B), engloba importantes funciones en la red de radio y se conecta directamente al puerto de acceso (**aGw**) del core de la red via interface S1. Las funciones del RNC son asumidas de forma mayoritaria por la estación base de LTE y parcialmente por la puerta de acceso.

LTE no necesita de canales dedicados, los cuales asignan un recurso fijo al usuario durante toda la conexión. En vez de eso, la estación base informa al usuario, si es necesario del recurso que está disponible para la transmisión de datos. Este principio de compartición de canales es usado también en HSDPA y es ideal para la transmisión de servicios con arquitectura de paquetes. De igual modo, LTE emplea para la corrección de errores el método **HARQ** (Hybrid Automatic Repeat Request) empleado en HSDPA y HSUPA. HARQ permite de forma rápida la retransmisión de paquetes recibidos de manera errónea.

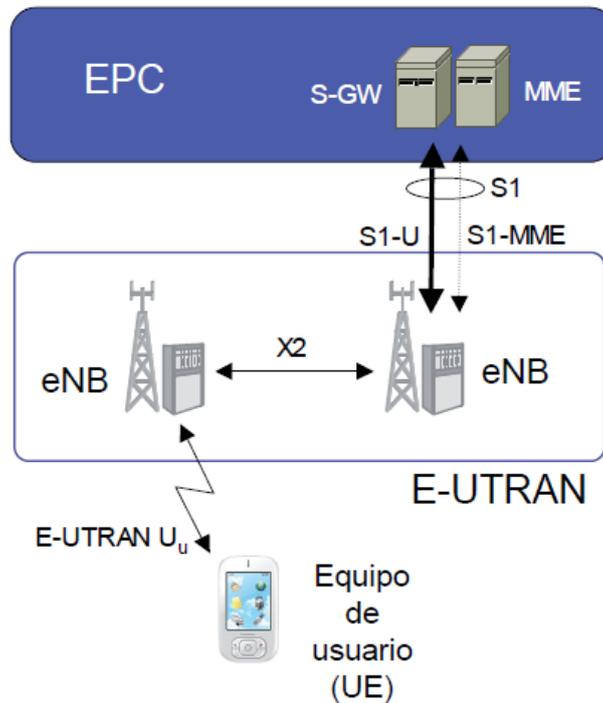
- **Nuevos Nodos.**

A la arquitectura inicial de una red GSM se agregan nuevos nodos, los que en definitiva permitirán las nuevas capacidades de esta red.

**EUTRAN (eNB):** El eNodeB soporta la interface de aire LTE e incluye funciones para control de recursos de radio, ciphering del plano del usuario y Protocolo de Convergencia de Datos en Paquetes (Packet Data Convergence Protocol - **PDCCP**). Se compone de un conjunto de EUTRAN-NodeBs, los cuales son los encargados de terminar los protocolos del plano usuario y control hacia el equipos de usuario.

Las funciones de EUTRAN son la gestión de los recursos de radio (control de portadoras radio, control por admisión radio, asignación dinámica de recursos en uplink y downlink, a los UEs), compresión de cabeceras y cifrado en el plano del usuario y encaminamiento del tráfico hacia la SAE GW, en esta red es notorio la desaparición de la RNC de respecto de la UMTS, con el objeto de simplificar la EUTRAN.

Para poder apreciar mejor el funcionamiento de E-UTRAN en la **Figura 33** se presenta un ejemplo de la red de Acceso E-UTRAN



**Figura 33: Red de Acceso E-UTRAN**

**MME** (Mobility Management Entity): Realiza funciones de autenticación, control de movilidad en estado Idle del UE (estado en que el UE está registrado en una red de paquete y tiene una dirección Ip asignada), control de señalización para movilidad (interfaz S3) así como funciones de seguridad asociada a la señalización. El MME, desde el punto de vista del plano de control, se puede ver como la evolución, en el nuevo CORE, de las funciones actualmente realizadas por el SGSN.

**SAE o EPS:** La migración o evolución futura de la arquitectura de red GSM es SAE. En la Versión 8, 3GPP está definiendo a EPS como un marco para la evolución o migración del sistema 3GPP hacia un sistema de paquetes optimizados de mayor velocidad de datos y menor latencia que soporte múltiples tecnologías de acceso de radio. El foco del trabajo está puesto en el dominio de conmutación de paquetes, en el supuesto de que el sistema dará soporte a todos los servicios en este dominio, incluso a la voz.

Se divide en dos entidades, la “serving SAE GW” y la “PDN SAE GW”, las cuales pueden estar o no dentro del mismo nodo. *Serving SAE GW* es la interfaz hacia la EUTRAN, del nuevo núcleo de paquetes en plano de usuario, es el punto de anclaje cuando se produce un handover interNodeB, y cuando hay movilidad inter3GPP (interfaz S4). *PDN SAE GW* conecta hacia las redes externas de datos PDN, se encarga de la generación de registros de tarificación (CDRs), y dispara hacia los nodos de control y tarificación online.

**HSS** (Home Subscriber Server): Es el nodo encargado de almacenar información de suscripción y datos de autorización necesarios para el acceso del usuario al nuevo sistema.

**PCRF** (Policy and Charging Rules Function): Nodo encargado de gestionar y provisionar en la PDN SAE GW las políticas de calidad de servicios y tarificación a aplicar al tráfico de usuario

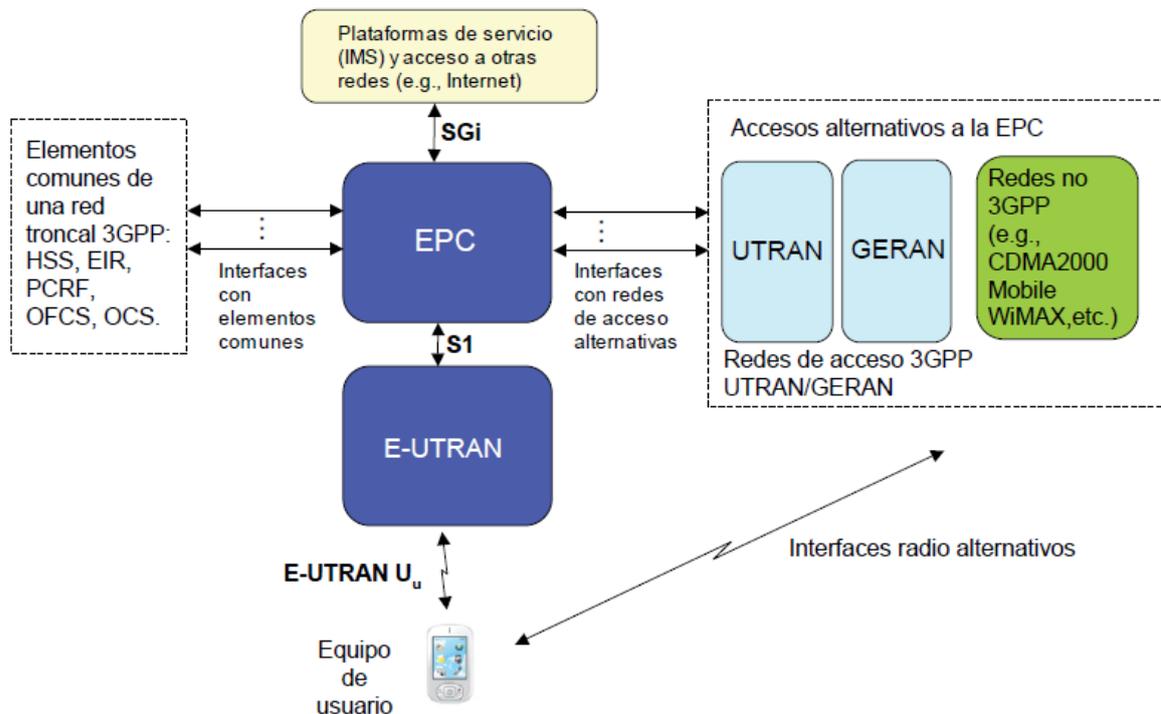


Figura 34: Arquitectura para LTE (Fuente [8])

- **Características de espectro.**

LTE les permite a los operadores una alta cantidad de flexibilidad al determinar el espectro en el que se implantará. LTE no sólo tendrá la capacidad de operar en una serie de bandas de frecuencia diferentes, sino que también permite un ancho de banda escalable. Mientras que UMTS/HSPA utiliza canales mixtos de 5 MHz, la cantidad de ancho de banda en un sistema LTE se puede escalar desde 1.25 a 20 MHz.

Puede lanzar redes con poca cantidad de espectro, junto con servicios existentes, y agregar más espectro a medida que los usuarios se pasan de sistema. Esto permite a los operadores adaptar sus estrategias de implantación de redes para ajustarse a sus recursos de espectro disponibles, sin tener que procurar que su espectro se adapte a una tecnología en particular.

LTE incrementará la eficiencia espectral sobre Rel-6 HSDPA en un factor de dos a cuatro, aproximándose a 2 bps/Hz en el downlink y a 1 bps/Hz en el uplink en condiciones ideales.

#### **4.3.2.2 Según el release 9**

Aunque en un principio fue anunciado como LTE advanced, esta versión no cumplía los parámetros de la IMT Advanced definidos por la ITU como los picos de tasas de datos más allá de 1 Gbit/s.

Sin embargo presenta mejoras que se incluyen como la optimización y nuevas características pospuestas para permitir a LTE realizar una entrada rápida al mercado, se especifican puntos como servicios de localización sobre EPS, servicios orientados a circuitos (CS) sobre EPS, MBMS para LTE, Redes autoorganizadas (SON), beamforming en descendente mejorado (de doble capa) y adaptación de tasa de vocoder para LTE.

3GPP Release 9 incluye mejoras para HSPA+. En el descendente, se especifica operación de doble portadora con 64QAM y MIMO. También hay una extensión para diversidad en transmisión para dispositivos que no soporten MIMO. La operación de doble portadora también será posible en el ascendente en redes LTE y UMTS. Se sigue con el desarrollo del Dual-Cell HSDPA con MIMO, y aparece el Dual-Cell HSUPA

#### 4.3.2.3 LTE Advanced (Release 10)

Debido a que el lanzamiento de esta versión es muy reciente, la información que se puede recaudar es muy poca. Sin embargo a continuación se detallan algunos de los requerimientos cumplidos para ser aprobado como tecnología 4G.

Entre los aspectos fundamentales se encuentran:

1Gbps para el canal descendente y 500 Mbps para el canal ascendente

- **Latencia:** se manejan dos tipos de latencia la del plano de usuario y la del plano de control

La latencia en el plano de control toma en cuenta los retardos introducidos por la **RAN** (Radio Access Network) y por la **CN** (Core Network) y excluye las latencias sobre las interfaces S1 (entre la estación base eNB y la entidad de gestión de movilidad MME) estado el sistema sin carga. Se debe lograr un tiempo de transición del modo idle (con direccionamiento IP asignado) al modo conectado menor a 50ms incluyendo el establecimiento del plano de usuario. Así mismo el tiempo de transición desde un estado dormido a un estado activo debe ser menor a 10ms.

Latencia del plano de usuario: el retardo en el plano de usuario se define en términos del tiempo de tránsito desde que un paquete está disponible en la capa IP ya sea el equipo de usuario UE o el nodo de borde de la RAN hasta que este paquete está disponible en la capa IP del EU o el nodo de borde de la RAN, siendo el nodo borde de la RAN el nodo que proporciona la interfaz RAN hacia el núcleo de la red. Se requiere obtener una latencia máxima de 5ms en el plano de usuario en condiciones sin carga como por ejemplo un paquete IP pequeño: 0 bytes de datos + encabezado IP.

- **Capacidad del plano de usuario:** el sistema deberá ser capaz de soportar como mínimo 300 usuarios activos sin recepción discontinua **DRX** en un ancho de banda de 5MHz.
- **Eficiencia espectral pico:** es la más alta velocidad de datos normalizada por el total del ancho de banda de la celda asumiendo condiciones libre de errores, cuando todos los recursos de radio disponibles para el enlace correspondiente (ascendente o descendente) son asignado a un solo UE. La eficiencia espectral pico para el enlace descendente debe ser de 30bps/Hz y para el enlace ascendente debe ser de 15bps/Hz. Asumiendo que la configuración de antenas es 8 x 8 o menos para el enlace descendente o 4 x 4 para el enlace ascendente.
- **Eficiencia espectral promedio:** se define como la tasa de transferencia efectiva (throughput) agregada de todos los usuarios, normalizada por el ancho de banda total de la celda dividido por el número de celdas se mide en b/s/Hz/cell.
- **Transferencia efectiva (throughput) de usuario en el borde de la celda:** es definida como el 5% de la función distribución acumulada de la tasa de transferencia efectiva (throughput) de usuario normalizada con el ancho de banda total de la celda.

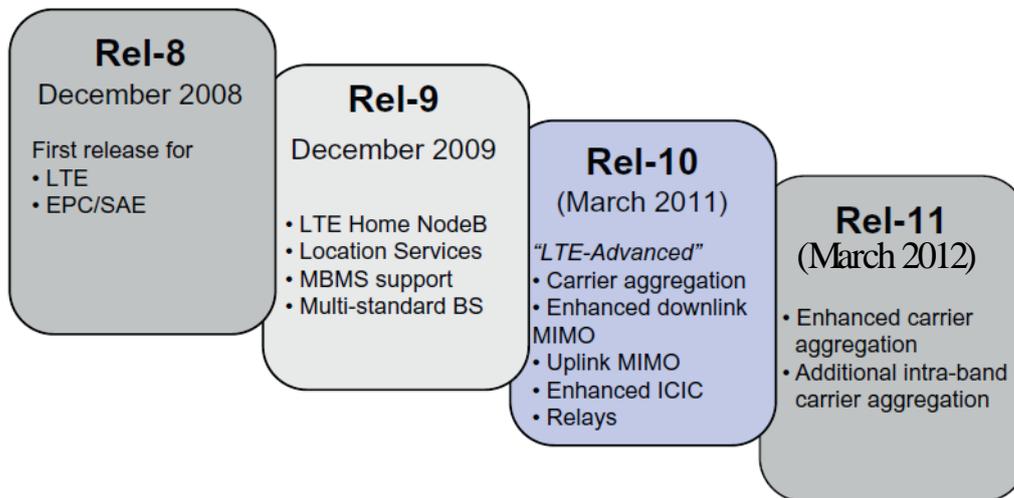
- **Capacidad VoIP:** El número de usuario de voz IP (VoIP), este requerimiento ya fue resuelto desde el lanzamiento 8 y cualquier combinación de antena cumple los requerimientos establecidos por la UIT.
- **Movilidad:** El sistema soportara movilidad entre redes celulares hasta 350 Km/h.
- **Cobertura:** El sistema debe estar enfocado en cumplir los requerimientos de cada uno de los apartados anteriores de la siguiente manera:
- **Mejoras adicionales en Multimedia Broadcast and Multicast Service MBMS11:** fue introducido en el lanzamiento 6, esta característica provee una forma para transmitir simultáneamente contenido idéntico desde una sola fuente a muchos equipos de usuario en uno o más sectores.

Los requerimientos extras son:

- **Flexibilidad del espectro:** LTE-avanzado debe estar en capacidad de operar en diferentes bandas de frecuencia y con diferentes tamaños, hasta 100 MHz, debe soportar FDD y TDD en bandas apareadas y no apareadas.
- **Escenarios de coexistencia:** LTE-avanzado está diseñado para mantener la coexistencia con diferentes tecnologías 3GPP:
  - Coexistencia y co-localización en la misma área geográfica con canales adyacentes GERAN/UTRA/E-UTRA.
  - Coexistencia y co-localización en la misma área geográfica entre operadores con canales adyacentes.
  - Coexistencia y/o solapamiento de espectro adyacente en las fronteras de los países.

- Operación de la E-UTRA Rel-8 y la E-UTRA avanzada en el mismo espectro.

En la **Figura 41** podemos notar la evolución de LTE iniciando desde el Rel-8 hasta la última de sus publicaciones Rel-11



**Figura 35: Evolución de LTE**

#### 4.4 Equipos de prueba en el mercado

Existen diferentes tipos de equipos de medidas para evaluar los distintos tipos de entornos y evaluar los logros de las últimas tecnologías existentes como lo son los sistemas MIMO. Anteriormente en el capítulo 3 analizábamos el hecho de que los equipos de medidas a usar dependerán de lo que se desea medir y los alcances que se pretenden tener con dicha evaluación.

##### 4.4.1 Equipos de testing de Rohde & Schwarz

Creemos que es de vital importancia recalcar la gran labor que han tenido estos equipos para las mediciones llevadas a cabo en los sistemas MIMO, en los últimos años han tomado gran importancia para las medidas que realizan las industrias de las telecomunicaciones, realizando todos con altos niveles de calidad, debido a su rapidez, eficacia, manejo sencillo y resultados precisos. Sus niveles de alcances crecen en paralelo al crecimiento de las redes.

Lideres en actualizaciones, ejemplo de ello es la preparación que han tenido para poder actualizar sus diferentes tipos de equipos en vista de la incursión de nuevos estándares como lo es LTE.



**Figura 36: configuración automática del generador de señales (Fuente: [16])**

La **Figura 35** muestra la configuración automática del generador de señales de Rohde & Schwarz que proveen las herramientas de diseño SPW / System Studio de Synopsys ofrece estímulos de prueba idénticos tanto en la simulación como en las pruebas reales. Una eficiente interacción entre los algoritmos y los probadores de hardware.

Rohde & Schwarz provee diferentes tipos de instrumentos dedicados a los múltiples estándares de radio comunicación que ofrece MIMO, entre ellos están Generadores & Analizadores de Señal y probadores móviles de Radio.

- **Generadores de Señal**

Permiten simular diferentes tipos de arreglos, generando desvanecimientos y otros efectos.

- **Analizadores de Señal**

Un único instrumento permite medir y modular diferentes tipos de arreglos

- **Probadores móviles de radio.**

Probadores de estado, utilizados en la comprobación de protocolos, con diferentes pruebas en múltiples escenarios

En la **Figura 36** se ilustran ejemplos de equipos diseñados por Rohde & Schwarz.



**Figura 37: Muestra de Instrumentos de la empresa Rohde & Schwarz (Fuente: [16])**

#### 4.4.2 Casos de estudios utilizando equipos de pruebas

A continuación nombraremos algunos casos utilizando diferentes equipos de medición, en diferentes entornos, así también de los logros alcanzados en cada uno de ellos.

- **Caso # 1 (Fuente [17]):**

**Nombre del proyecto:** “Medidas MIMO de banda ancha en interiores para WiFi”

**Autor (es):** Oscar Gascón Francés, Alberto García Zapata, Rubén Ibernón Fernández, José María Molina García-Pardo y Leandro Juan Liácer

**Objetivo:** Medir la respuesta del canal en un entorno de interiores para un sistema MIMO. Se ha seleccionado la banda de frecuencias utilizada por WiFi (2.4-2.5 GHz).

**Equipos utilizados:** Se ha utilizado un equipo de medidas basado en un analizador de redes multipuerto. También se han estudiado diferentes espaciados entre antenas y orientaciones del arreglo para ver su influencia en las prestaciones de un posible sistema WiFi sobre MIMO.

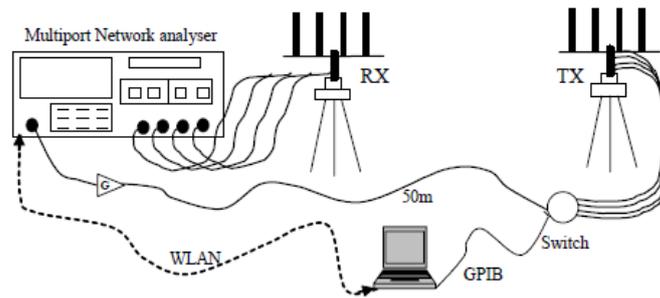


Figura 38: Diagrama del equipo de medidas basado en un analizador de redes multipuerto y un conmutador (Fuente [17]).

El equipo consta de un analizador de redes multipuerto ENA (**Figura 37**) que actúa de transmisor-receptor. Cuatro antenas receptoras se conectan directamente a cuatro puertos del ENA. Otro de los puertos del mismo equipo hace de transmisor, conectándose un amplificador de 30 dB, un cable de 50 metros de bajas pérdidas y un conmutador de estado sólido para ampliar el número de antenas transmisoras a 4. El rango dinámico máximo con el cable de 50 metros es de unos 90 dB. El control de las medidas es totalmente automático y se realiza a partir de un portátil que se conecta al conmutador mediante un puerto GPIB y al analizador de redes multipuerto mediante una WLAN. Se han utilizado 8 antenas omnidireccionales de CISCO con ganancia 5 dBi.

**Logros obtenidos:** Se han estudiado diferentes parámetros como la capacidad, la correlación el factor K y la dispersión del retardo. Se concluye que para que un sistema MIMO funcione óptimamente el espaciado debe ser grande y la orientación debe ser de tal forma que las direcciones de radiación máxima de los arreglos estén enfrentadas.

- **Caso # 2 (Fuente [18]):**

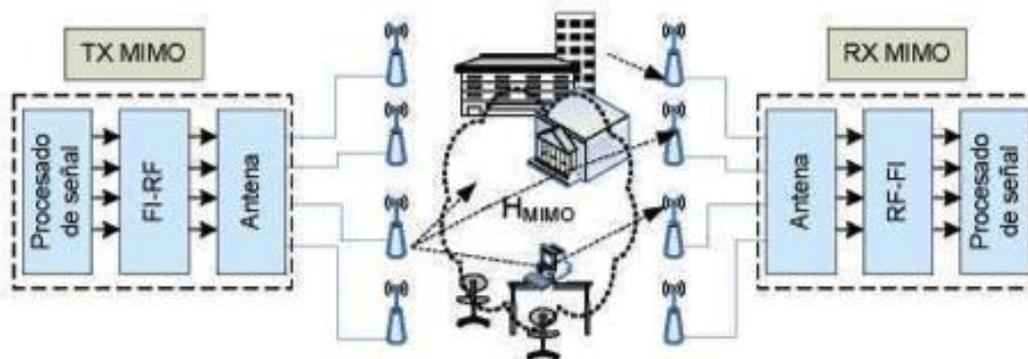
**Nombre del proyecto:** Caracterización espacial de canal mediante sistemas multiantena con OFDM

**Autor (es):** Jonathan Mora Cuevas, Carlos Gómez Calero, Leandro de Haro.

**Objetivo:** se pretende proporcionar datos experimentales (resultados de medida obtenidos con el testbed MIMO) para validar los resultados de simulación presentados en este artículo.

**Equipos Utilizados:**

La arquitectura del testbed de medida se divide en 3 módulos principales. La etapa del procesado de señal, la de RF-IF y el modulo de antena. El modo de operación esta basado en un procesado de señal *offline*. Respecto a las señales transmitidas, estas son generadas en el entorno de programación MATLAB. Las señales OFDM generadas son transmitidas independientemente por cada una de las antenas del transmisor.



**Figura 39: Arquitectura del Testbed MIMO-OFDM (Fuente [18]).**

El sistema de posicionamiento está basado en un scanner plano, mostrado en la **Figura 38**. La posición del soporte de la antena es controlada por un par de motores paso a paso que permite movimientos de translación. El sistema de posicionamiento tiene 2 brazos a lo largo de 2 ejes ortogonales, con movimiento independiente uno del otro de tal manera que es muy flexible en cuando a la geometría de arreglo virtual que se puede formar.

El scanner (Figura 39) es controlado por software. Una unidad de control (GCD) recibe los comandos de un PC que se conecta a través del puerto serie. La GCD transfiere los comandos a un motor paso a paso que se encarga de mover el soporte de la antena a lo largo de la dirección de un brazo. El otro brazo del scanner tiene la misma estructura de funcionamiento. El movimiento es independiente en ambas direcciones.

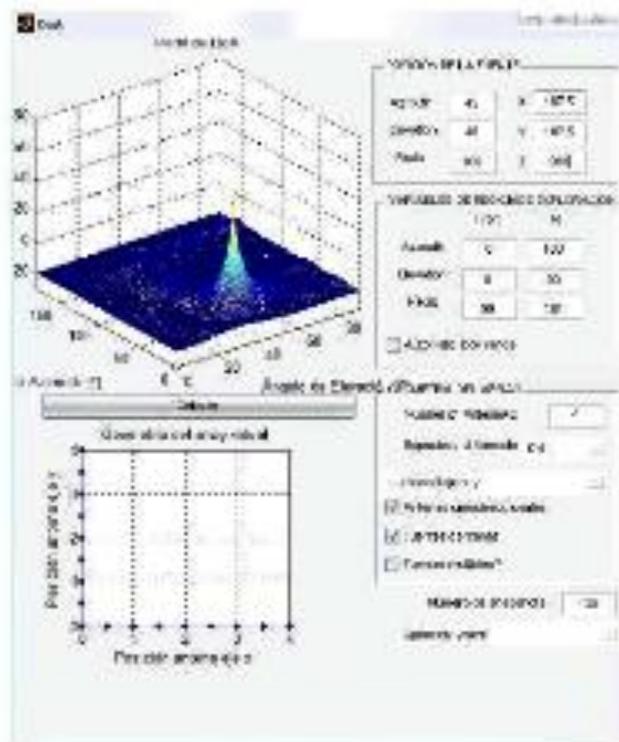
Los errores de posicionamiento de la antena se traducen en errores en la estimación de la fase de las señales recibidas en cada punto de medida. Para el caso de un arreglo virtual plano con un espaciado entre antenas de media longitud de onda y sin error de posicionamiento. Al desplazar mecánicamente el soporte de la antena, el error por posicionamiento puede reducirse en el modelo de datos de señal.



**Figura 40: Scanner Plano (Fuente [18]).**

La programación de rutinas de movimiento del scanner permite probar distintas configuraciones de arreglo, tanto virtuales como no virtuales. Con este fin, se desarrollo una interfaz gráfica, mostrada en la **Figura 40**, de fácil manejo para configurar tanto la geometría de arreglo que puede formarse, como el número de elementos de arreglo y la separación en fracciones de longitud de onda de las señales incidentes. En relación con la caracterización de canal, el elevado número de *snapshots* medidos en cada punto de medida mejora la estimación de la matriz de covarianza muestreada en relación a la matriz de covarianza teórica.

Para apreciar mejor la **Figura 40** nos muestra la interfaz gráfica de la aplicación.



**Figura 41: Interfaz de la aplicación (Fuente [18]).**

### **Logros Obtenidos:**

El proyecto presento la caracterización espacial del canal mediante la estimación de la DoA. Para ello, se diseño un sistema de posicionamiento automático basado en un Scanner para evaluar distintas configuraciones de arreglos, así como para para evaluar distintas antenas (arreglos virtuales, antenas para MIMO) se presentaron las características principales del diseño de un testbed MIMO con OFDM con el objetivo de realizar distintas campañas para validar los resultados mostrados.

## CONCLUSIONES

En este documento, hemos realizado un estudio de los sistemas MIMO enfocado en los aspectos técnicos y prácticos. A lo largo del estudio, describimos los principios básicos de los sistemas MIMO, su definición, evolución, en donde en dicho estudio hemos detallado las transformaciones que ha sufrido la tecnología inalámbrica desde la primera generación, la cual se caracteriza por estar basada en la tecnología analógica, pasando por la segunda generación que se basa en tecnologías digitales, guiándonos hacia la tercera generación la que se basa en patrones digitales y orientada a la telefonía celular y nos lleva a la cuarta generación la cual esta enfocada completamente en el protocolo IP, su capacidad para comunicaciones MIMO multiusuarios.

Se presentó las ventajas y desventajas de los sistemas MIMO ante los sistemas convencionales de comunicaciones inalámbricas (SISO), al evaluar y comparar la capacidad de canal en un ambiente simulado por medio del Software MATLAB, soportada en la teoría de la información de Shannon a través de la cual se han desarrollado numerosas técnicas para explotar el ancho de banda disponible en un canal, tanto en recepción como en transmisión y se simula la capacidad del canal versus SNR (las cuales están directamente relacionadas) y a través de esto se obtiene el resultado que plantea dicha teoría, la cual a mayor cantidad de antenas, la capacidad del canal incrementa.

Esta simulación se corrobora usando como ejemplos estudios de campo anteriormente realizados dado que por factores de tiempo no hemos podido realizar la simulación) e igualmente apreciando la manera como MIMO se expone en las diferentes aplicaciones de telefonía móvil como LTE, WiMax, y WiFi en donde a su vez describimos aspectos teóricos de cada uno de ellos.

## RECOMENDACIONES

Les orientamos a seguir con el análisis del desarrollo este tipo de sistemas y los avances que se oriente en torno a ellos, de igual manera quisiéramos proponer para los próximos interesados en el tema, la simulación en torno a los estándares que utilizan como herramienta los sistemas MIMO.

Creemos que los sistemas MIMO es un tema complejo y de vital importancia para la evolución de las Telecomunicaciones y en especial para las comunicaciones inalámbricas, por lo cual es necesario instar a más estudiantes interesados en el área a profundizar en el tema.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lars Skyttner “*General Systems Theory: Problems, Perspectives, Practice*”, 2da Edición World Scientific Publishing, pp.: 222-223, 2005. ISBN: 981-256-389-X
- [2] DA Gore, RU Nabar, and H.Bölcskei “*An overview of MIMO Communications- A key to Gigabit Wireless*”. Proc. of the IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 198-218, Feb 2004
- [3] C. E. Shannon. “*A Mathematical Theory of Communication*”. Bell System technical journal, Vol.27, pp.379- 423 and 623-656, July and October 1948.
- [4] G. J. Foschini. “*Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas*”,. Bell Labs. Tech. Journal, Vol. 1, No 2, pp 41-59. Autumn 1996.
- [5] IE Telatar. “*Capacity of multi-antenna Gaussian channels*”. European Transactions on Telecommunications and Related Technologies Journal, vol. 10, No. 6, pp. 585–595. November 1999.
- [6] Oriol Sallent Roig. “*Principios De Comunicaciones Móviles*” 1er Edición, UPC Edicions, Septiembre 2003. ISBN: 84-8301-715-6.
- [7] Carmen Botella Mascarell. “*Algoritmos para sistemas de comunicaciones Multi-usuario con múltiples antenas*”. Tesis Doctoral – Universidad Politécnica de Valencia. Abril 2008.
- [8] R. Agustí; F. Bernardo; F. Casadevall; R. Ferrús; J. Pérez-Romero; O. Sallent. “*LTE: Nuevas Tendencias en Telecomunicaciones*”, 1era edición Fundación Vodafone España, pp.: 198-200, 2010. ISBN: 84-934740-4-5
- [9] Sampath, H. S.; Talwar, S.; Tellado, T. J.; Erceg, “*A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results*”. IEEE Communications Magazine, September 2002.
- [10] Yang, H.; Alcatel Shanghai Bell Co. “*A Road to future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-Based Air Interface*”. IEEE Communications Magazine, January 2005.
- [11] Theodore S. Rappaport: Joseph C. Liberti. “*Smart Antennas for Wireless Communications*”, 1er Edición, Prentice Hall, April 1999. ISBN: 0137192878

- [12] C. Gomez; L. Garcia; J. Simon; L. de Haro "Efectos reales de implementación, medidas de canal y algoritmos espacio-temporales con un demostrador MIMO". Paper-Universidad Politecnica de Madrid, Sept. 2006.
- [13] F. Harrysso; J. Medbo; A. F. Molisch; A. J. Johansson; F. Tufvesson "The Composite Channel Method: Efficient Experimental Evaluation of a Realistic MIMO Terminal in the Presence of a Human Body". Mitsubishi Electric Research Laboratories, August 2008.
- [14] H. Boleskei, D. Gesbert, A.J. Paulraj, "On the capacity of OFDM-based multi- antenna systems," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No. 2, pp. 225-234, February 2002.
- [15] D. Diaz Martin "Prototipo de un sistema WIMAX 2x2", Tesis-Universidad Carlos III de Madrid, Enero 2010.
- [16] <http://www2.rohde-schwarz.com/>
- [17] O. Gascón, A. García, R. Ibernón, J. Molina, L. Liácer. "Medidas MIMO de banda ancha en interiores para WiFi". Paper-Universidad Politecnica de Cartagena, Sept. 2005.
- [18] J. Mora, C. Gomez, L. de Haro. "Caracterización espacial de canal mediante sistemas multiantena con OFDM". Paper-Universidad Politecnica de Madrid, Sept. 2008.
- [19] <http://www.broadbandbuyer.co.uk/Shop/ShopDetail.asp?ProductID=5106>



hold on----> Declara que la figura que se esta formando en base a las iteraciones tiene que esperar hasta que ya estén formadas todas las 5 que fueron declaradas en el primer for: for(k = 1 : 5)

plot(SNR\_V\_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:)) →  
Dice que es lo que hay que graficar

```
f2 = figure(2);
hold on
[y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
plot(x,y/Iteration, 'color',color(k,:));
clear landas
Lo mismo que en F1
end

f1 = figure(1)

legend_str = [];
for( i = 1 : length(nt_V) )
    legend_str =[ legend_str ;...
        {'nt = ',num2str(nt_V(i)), ' , nr = ',num2str(nr_V(i))}]];
end
Convierte los números en cadenas
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1, 'color',[1 1 1])
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacidad bits/s/Hz')
} Asigna las leyendas a los Correctos
plots en base a los rotulos Específicos
} Simplemente forma la grafica con los rótulos

f2 = figure(2)
legend(legend_str)
grid on
set(f2, 'color',[1 1 1])
ylabel('pdf of elements in matrix landa in svd decomposition of marix H')
```

```
function [Capacity PowerAllo] = WaterFilling_alg(PtotA,ChA,B,N0);
```

Lo que hace esta función no es más que rellenar los espacios en los ámbitos que corresponden, por ejemplo:

```
function [Capacity PowerAllo] = WaterFilling_alg(PtotA,ChA,B,N0);
[Capacity(i,j)PowerAllo]=WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
```

Le deja a Capacity las mismas variables pero las va a sustituir con las variables que se definieron en la función, ej: PtotA con Pt

```

ChA = ChA + eps; Define al canal A y le agrega el espaciamento de los
puntos flotantes de los números
NA = length(ChA); este es el numero de subcanales
H = ChA.^2/(B*N0); mejor conocida como la matriz
PowerAllo = (PtotA + sum(1./H))/NA - 1./H;
while (length(find(PowerAllo < 0 ))>0)
    IndexN = find(PowerAllo <= 0 );
    IndexP = find(PowerAllo > 0 );
    MP = length(IndexP);
    PowerAllo(IndexN) = 0;
    ChAT = ChA(IndexP);
    HT = ChAT.^2/(B*N0);
    PowerAlloT = (PtotA + sum(1./HT))/MP - 1./HT
    PowerAllo(IndexP) = PowerAlloT;
End
PowerAllo = PowerAllo.';
Capacity = sum(log2(1+ PowerAllo.' .* H));

```

ABAJO

Empieza a  
Aplicar  
las formulas y  
Darle  
parámetros

## Anexo B:

La siguiente Tabla ha sido elaborada de acuerdo a los parámetros actuales del mercado con respecto a los tres principales estándares que se benefician de los sistemas MIMO, para ello se ha tomado en cuenta las diferentes empresas que actualmente se relacionan con los sistemas de cuarta generación, como Nokia, Motorola, Sony, entre otros.

Los parámetros a definirse son: Banda de Frecuencia, Técnicas que utilizan cada uno de los estándares y una comparación entre los arreglos de antenas utilizados en el 2006 y los que actualmente se utilizan, todos ellos aterrizados a lo que actualmente se distribuye en el mercado.

| <b>Estándar</b>                        | <b>IEEE 802.11 n</b> | <b>IEEE 802.16e</b>               | <b>LTE Avanzado</b> |
|--|----------------------|-----------------------------------|---------------------|
| <b>Banda de Frecuencia</b>             | 2.4 GHz / 5 GHz      | 700MHz / 2.3GHz / 2.5GHz / 3.5GHz | Up to 100MHz        |
| <b>Técnicas Utilizadas</b>             | OFDM                 | OFDM / OFDMA                      | OFDMA / SC-FDMA     |
| <b>Arreglo de Antenas (2006)</b>       | 2x2                  | 2x1                               | 2x1 (Rel 7)         |
| <b>Arreglo de Antenas (Actualidad)</b> | 3x3                  | 2x2 DL<br>1x2 UL                  | 4x4 DL<br>2x4 UL    |

## Anexo C:

El siguiente diagrama muestra la manera como esta estructurado el código en Matlab® del programa que simula la capacidad Vs. el SNR.

