

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Simulación de los enlaces descendente y ascendente de LTE en Matlab

Autor: German Alejandro Antomarchi Toussent

Tutor: Dr. Cs. Arturo Infante Rielo

Santiago de Cuba

Junio, 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Simulación de los enlaces descendente y ascendente de LTE en Matlab

Autor: German Alejandro Antomarchi Toussent

german.antomarchi@tle.fie.uo.edu.cu

Tutor Dr. Cs. Arturo Infante Rielo

Profesor titular. Universidad de Oriente

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones

ainfante@fie.uo.edu.cu

Santiago de Cuba

Junio, 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

“El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamiento, porque precisamente es lo que más estamos sembrando; o lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia (...)”

Fidel Castro.

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre por ser mi guía donde quiera que esté.

A mi madre, mi hermana y mi tía por apoyarme incondicionalmente y ser la estabilidad de mi vida.

A toda mi familia por estar siempre pendiente de mis resultados académicos.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre por haberme educado y hacer de mí la persona que soy hoy.

A mi madre por ser luz y faro de mi vida, por darme fuerza, amor, dedicación y apoyo incondicional.

A mi tutor Arturo Infante Rielo por su apoyo y dedicación.

A mi hermana por confiar en mí en todo momento.

A mi tía por estar siempre presente y ofrecerme su apoyo sin límites.

A mi novia por estar presente en los buenos y malos momentos de esta etapa tan importante de mi vida.

Al colectivo de profesores y demás personas que durante cinco años contribuyeron a mi formación como profesional.

A todos, muchas gracias

RESUMEN

En este trabajo se hizo un estudio de los fundamentos de la tecnología LTE, que es la empleada en los teléfonos móviles de 4ta. Generación haciendo énfasis en los aspectos de la capa física. Se analizaron las características de los enlaces descendente y ascendente, los fundamentos teóricos, las principales características de las señales que permiten al terminal móvil sincronizarse al sistema y demodular coherentemente las distintas señales y los canales involucrados a los enlaces en la capa. Se realizó la simulación de los enlaces descendentes y ascendentes que emplean las formas de acceso OFDMA y SCFDMA, empleando funciones del *LTE System Toolbox* que viene integrado con el MATLAB 2014 en su versión 8.3.0.532, lo que permitió obtener las formas de ondas en el tiempo y la densidad espectral de potencia. La visualización se lleva a cabo con la ayuda de las herramientas presentes en la biblioteca de componentes del *software* utilizado. Se realizaron comparaciones respecto a la magnitud del vector error (EVM) y la capacidad del canal, basadas en la variación de diferentes parámetros del sistema para ambos enlaces. Finalmente se analiza la fidelidad de los enlaces a partir de la razón de bits erróneos (*BER*) y la eficiencia energética empleando la relación potencia pico a potencia promedio (PAPR).

Palabras clave: LTE, OFDMA, SCFDMA, EVM, BER, PAPR

ABSTRACT

This paper presents a study of the fundamentals of LTE technology, which is used in mobile phones, became 4th. Generation emphasizing aspects of the physical layer. The characteristics of the downlink and uplink, the theoretical foundations, the main features of the signals that allow the mobile terminal to synchronize the system and coherently demodulate the various signals and channels involved in the links at the layer were analyzed. Simulating the downlink and uplink employing OFDMA and SCFDMA forms access using LTE System Toolbox functions that comes integrated with MATLAB 2014 version 8.3.0.532 was performed, which allowed obtaining the waveforms in the time and power spectral density, the display is performed with the help of tools present in the library of software components used. Comparisons were made regarding an error vector magnitude (EVM) and the channel capacity based on the variation of different system parameters for both links. Finally fidelity links is analyzed from the bit error rate (BER) and the energy efficiency employing peak to average power ratio (PAPR).

Keywords: LTE, OFDMA, SCFDMA, EVM, BER, PAPR

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LTE..... | 4 |
| 1.1 Arquitectura del sistema LTE | 4 |
| 1.1.1 Arquitectura general de los sistemas celulares | 4 |
| 1.1.2 Arquitectura general del sistema LTE..... | 5 |
| 1.1.3 Especificaciones de LTE | 6 |
| 1.2 Tecnologías de nivel físico. OFDMA, SC-FDMA y MIMO..... | 7 |
| 1.2.1 OFDMA..... | 7 |
| 1.2.2 SC-FDMA | 10 |
| 1.2.3 MIMO..... | 14 |
| 1.3 Conceptos importantes de la interfaz radio | 16 |
| 1.3.1 Capa física..... | 16 |
| 1.3.2 Bloque de recursos físicos (Physical Resource Block) | 17 |
| 1.3.3 Estructura de la trama..... | 19 |
| 1.3.4 Enlace descendente..... | 19 |
| 1.3.5 Enlace ascendente..... | 22 |
| CAPITULO 2. Implementación de enlaces LTE | 26 |
| 2.1 LTE System Toolbox para MATLAB..... | 26 |
| 2.2 Implementación del enlace descendente | 27 |
| 2.2.1 Funciones del LTE System Toolbox utilizadas en el enlace descendente ... | 28 |
| 2.2.2 Parámetros utilizados en el enlace descendente..... | 31 |
| 2.3 Implementación del enlace ascendente | 32 |
| 2.3.1 Funciones del LTE System Toolbox utilizadas en el enlace ascendente | 33 |
| 2.3.2 Parámetros utilizados en el enlace ascendente | 35 |
| 2.4 Modelos de canal multitrayectoria empleado..... | 36 |
| 2.5 Capacidad del canal según el número de antenas empleadas..... | 39 |
| 2.5.1 Capacidad con el empleo de SISO | 39 |
| 2.5.2 Capacidad con el empleo de MIMO | 41 |
| 2.6 Control de potencia | 41 |
| 2.7 Unidad de control de errores (HARQ) | 43 |
| CAPITULO 3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENLACES LTE..... | 45 |
| 3.1 Análisis de los resultados del enlace descendente..... | 45 |
| 3.1.1 Estimación de la densidad espectral de potencia por el método de Welch.. | 47 |

| | | |
|-------------------------------------|--|----|
| 3.1.2 | Periodograma | 48 |
| 3.1.3 | Análisis de la magnitud del vector error..... | 50 |
| 3.1.4 | Fidelidad del enlace. Análisis de la BER | 54 |
| 3.2 | Análisis de los resultados del enlace ascendente..... | 55 |
| 3.2.1 | Estimación de la densidad espectral de potencia por el método de Welch.. | 57 |
| 3.2.2 | Análisis de la magnitud del vector error..... | 58 |
| 3.2.3 | Fidelidad del enlace. Análisis de la BER | 59 |
| 3.3 | Comparación de la proporción de errores entre los enlaces..... | 60 |
| 3.4 | Resultado de la capacidad del canal | 61 |
| 3.5 | PAPR para OFDMA y SCFDMA..... | 62 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 64 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 66 |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS..... | | 69 |
| ANEXOS..... | | 72 |

INTRODUCCIÓN

El mundo de la telefonía móvil está en continuo crecimiento y frecuentemente se introducen nuevas tecnologías para ofrecer a los usuarios un mejor servicio. Después de haber pasado por 1G, 2G, 3G, la llamada 3.5G, HSPA (*High Speed Packet Access*) se llega en estos momentos a la Cuarta Generación (4G), que ya es totalmente IP y utiliza la tecnología LTE (*Long Term Evolution*) [1], [2], [3], donde se busca un sistema que permita conjugar una capacidad multimedia con una movilidad plena.

Con LTE se introduce una gran variedad de novedades respecto a los anteriores estándares, pero la mayor novedad es que por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, sean soportados por el protocolo IP. Las velocidades que se pueden conseguir en la interfaz de radio con LTE también aumentan respecto a la última generación, llegando a valores nominales de hasta 100 Mbps en el enlace descendente y a 50 Mbps en el enlace ascendente [4].

Para atender el enorme crecimiento en la transferencia de datos inalámbricos, se están introduciendo dispositivos y redes de comunicaciones móviles de 4G. LTE, es una tecnología estandarizada por la 3GPP (*3rd. Generation Partnership Project*) que es un acuerdo de colaboración en tecnología móvil y ha sido diseñada para ofrecer gran capacidad y velocidad por la red móvil, con el objetivo de abordar la creciente demanda de datos de los dispositivos móviles. LTE utiliza las tecnologías de antena MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) para transmitir datos de una forma más efectiva que las generaciones anteriores de tecnologías de comunicaciones móviles. Emplea para el enlace descendente la técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y para el enlace ascendente la técnica denominada SCFDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) por lo que es sumamente eficiente en el uso del espectro disponible y satisface los requerimientos de eficiencia energética en el terminal. [4], [5].

LTE posee en el enlace descendente y ascendente canales físicos de tráfico compartidos y canales físicos de control, utilizados para transportar tanto señales de control generadas

en la capa física del sistema como los mensajes de control generados en las capas superiores del sistema [6], [7], [8].

Los nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas se centran en mejorar el acceso universal radio terrestre (UTRA) y en la optimización de su arquitectura. Mayores anchos de banda de transmisión y el aumento de la tasa binaria son objetivos primordiales. LTE (*Long Term Evolution*) se presenta como un nuevo estándar para sistemas móviles basados en la norma 3GPP (Release 8 y posteriores) orientado a cumplir todas estas nuevas expectativas [7].

En nuestro país la tecnología que está implementada en la red celular es mayoritariamente GSM (2G), habiéndose actualizado hasta la prestación de servicios correspondientes a 2.5 G. No obstante, la voluntad del estado, expresada recientemente por las máximas autoridades del país, con relación a una acelerada y abarcadora informatización de la sociedad, deja claro que los servicios de la telefonía móvil requerirán, pasando por 3G, de aquellos típicos de los que presta la 4G. Lo anterior demanda el estudio de esta tecnología con el objetivo de estar en mejores condiciones de su asimilación, despliegue y evaluación. En nuestra área se cuenta con los recursos profesionales y computacionales para realizar estudios teóricos y de simulación que contribuyan a lo anterior.

Problema Científico:

Falta de dominio de las herramientas de simulación que permitan determinar los parámetros de desempeño de sistemas de telefonía móvil de cuarta generación, en particular los sistemas LTE, en presencia de factores limitantes como el ruido y los efectos multitrayectoria, lo cual limita la realización de ulteriores investigaciones en tan importante campo.

Hipótesis:

Con el dominio del empleo de las herramientas específicas para LTE incorporadas a las últimas entregas del software de Matlab, se estaría en condiciones de evaluar las diferentes opciones de estos sistemas modernos de telefonía móvil, ante las limitaciones

propias de los medios inalámbricos y con ello contribuir al desarrollo de investigaciones sobre esta tecnología.

Objeto de estudio

Tecnología móvil de Cuarta Generación (LTE)

Objetivo general:

Simular y evaluar el desempeño, utilizando las herramientas para LTE del Matlab, de sistemas de telefonía móvil LTE, particularizando en la capa física de los enlaces descendente y ascendente.

Objetivos específicos:

1. Profundizar en los aspectos teóricos y tecnológicos de la tecnología LTE.
2. Implementación de los enlaces descendente y ascendente de LTE en Matlab.
3. Análisis de los resultados obtenidos.

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, el trabajo se estructura en tres capítulos. En el **Capítulo 1** se analizan los fundamentos teóricos y tecnológicos que caracterizan al sistema LTE, profundizando en las características que posee a nivel físico y las técnicas de acceso en la interfaz de radio para los enlaces descendente y ascendente. En el **Capítulo 2** se realiza la implementación de los enlaces empleando el software MATLAB en su versión 8.3.0.532 y se describen las características y parámetros empleados. En el **Capítulo 3** se realiza el análisis y la evaluación de los resultados obtenidos a partir de la implementación.

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LTE

LTE nació para cubrir principalmente las necesidades de los usuarios que requieren una conexión de datos de mayor velocidad en los enlaces de subida y de bajada. Es una tecnología muy buena y estable ya que permite altas tasas de bits con baja latencia, barata y fácil de desplegar por los operadores que quieren un estándar menos complejo y que reduzca los costos.

1.1 Arquitectura del sistema LTE

Los nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas se centran en mejorar el *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) y en la optimización de su arquitectura. Mayores anchos de banda de transmisión y el aumento de la tasa de transmisión de datos son objetivos primordiales.

1.1.1 Arquitectura general de los sistemas celulares

Se pueden identificar tres elementos principales que constituyen la arquitectura de un sistema de comunicaciones celular [1]:

- **Equipo de usuario:** Dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios que ofrece la red. El dispositivo del usuario tendrá una tarjeta inteligente, que comúnmente se denomina tarjeta SIM (*Subscriber Identity Module*), que contendrá la información necesaria para poder conectarse a la red y poder disfrutar de los servicios que ofrece el proveedor de servicio. Se conectará a la red a través de la interfaz radio.
- **Red de acceso:** es la parte del sistema que realiza la comunicación, la transmisión por radio, con los equipos de usuario para proporcionar la conectividad con la red troncal. Es la responsable de gestionar los recursos de radio que estén disponibles para ofrecer los servicios portadores de una manera eficiente. La red de acceso está formada por estaciones base y dependiendo de la generación, por equipos controladores de estaciones base.
- **Red troncal:** Parte del sistema que se encarga del control de acceso a la red celular, por ejemplo la autenticación de los usuarios, gestión de la movilidad de los usuarios,

gestión de la interconexión con otras redes, control y señalización asociada al servicio de telefonía, entre otras. Los equipos que conforman esta red albergan funciones de conmutación de circuitos, conmutación de paquetes, enrutamiento, bases de datos entre otras.

1.1.2 Arquitectura general del sistema LTE

La arquitectura LTE está diseñada con el objetivo de soportar tráfico de conmutación de paquetes; con movilidad sin fisuras, calidad de servicio y mínima latencia. Presenta una arquitectura más plana y simplificada, con sólo dos tipos de nodos; el núcleo de red llamado EPC (*Evolved Packet Core*) que constituye la red troncal y la red de acceso conocida como E-UTRAN (*Evolved UTRAN*), la arquitectura completa se denomina por la 3GPP como EPS (*Evolved Packet System*), como se muestra en la Figura 1.1 [9]. Todos los componentes que engloban este sistema están diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no es necesario disponer de un dispositivo que trabaje en modo circuito. En la Figura 1.1 se aprecia la arquitectura simplificada del sistema LTE.

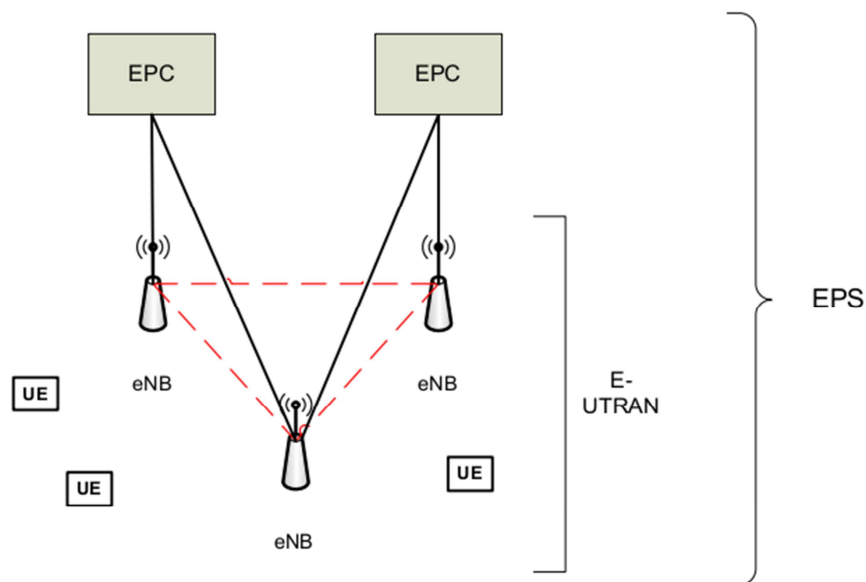


Figura 1.1 Esquema simplificado de la arquitectura del sistema LTE

Otra característica de LTE es que se contempla también el acceso a sus servicios a través de UMTS (*Universal Mobile Telephone System*) y GSM (*Global System for Mobile*

Communications). También mediante otras redes de acceso como CDMA2000 (*Code Division Multiple Access 2000*), WiMAX, redes 802.11 y otras.

La red física que se utiliza en LTE para interconectar todos los equipos de la red, que se denomina red de transporte, es una red IP convencional. En la infraestructura de red LTE aparte de los equipos que realizan las funciones específicas del estándar, también habrá elementos de la red propios de redes IP como enrutadores, servidores DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), servidores de DNS (*Domain Name System*), conmutadores, etc. [2], [4].

1.1.3 Especificaciones de LTE

Para la tecnología LTE, el 3GPP marcó unos requerimientos exigentes a las tecnologías de acceso con el principal objetivo de que estas evolucionaran. Estos requerimientos, en resumen, son:

1. Reducción de los retardos de transmisión: retardos en establecimiento de conexión y latencia.
2. Incrementar la tasa de datos de los usuarios: como objetivo la velocidad de datos es de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente, en un ancho de banda de 20 MHz.
3. Ancho de banda escalable: deben soportarse anchos de banda de 20, 15, 10, 5, 3 y 1.4 MHz.
4. Posibilidad de uso de banda pareada o modo FDD (*Frequency Division Duplex*) y no pareada o modo TDD (*Time Division Duplex*).
5. Mejorar la tasa de datos de los usuarios en el límite de la celda que son los más afectados por las interferencias.
6. Mejora de la eficiencia espectral lo que implica reducir el costo por bit.
7. Arquitectura de red simplificada.
8. Consumo de potencia razonable por parte del terminal móvil.
9. Mejora de la cobertura.
10. Calidad de servicio: se ha de garantizar calidad de servicio extremo a extremo. El servicio de Voz sobre IP (VoIP) debe soportarse con las mismas prestaciones con las que se ofrece un servicio de voz para conmutación de circuitos.

Dados estos requerimientos, se entiende que el funcionamiento ofrecido por el sistema LTE ha de ser claramente superior al existente en las redes 3GPP basadas en HSPA. Para hacer posible muchas de las especificaciones, tales como la velocidad de transmisión y eficiencia espectral, LTE introduce tecnologías de acceso multiportadora, las cuales proporcionan ortogonalidad entre usuarios, reduciendo las interferencias y mejorando la capacidad de la red.

La asignación de recursos en el dominio de la frecuencia se hace con una resolución de 180 kHz y la mínima unidad de asignación de recursos, denominada PRB (*Physical Resource Block*), tanto para el enlace descendente como para el ascendente. Así, con la asignación de recursos en el dominio de la frecuencia, será posible que LTE incremente la capacidad del sistema.

Sin embargo, esta capacidad también se verá afectada por la arquitectura de la red. En este caso LTE presenta una solución con una arquitectura de red eficiente, en la cual se mejora la escalabilidad y se reduce la latencia, mediante la reducción de un número de elementos en la red. En el caso de LTE, en el eNB (celda o estación base) se incluyen todos los algoritmos que en la arquitectura de red del Release 6 formaban parte del RNC (*Radio Network Controller*), teniendo así una arquitectura de red más distribuida que en las anteriores tecnologías [5].

1.2 Tecnologías de nivel físico. OFDMA, SC-FDMA y MIMO.

En este subepígrafe se definen los fundamentos más importantes del nivel físico que se implementan en el sistema LTE y que permiten alcanzar mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos de radio que los sistemas predecesores. En el enlace descendente se usa la técnica de acceso múltiple denominada OFDMA y para el enlace ascendente la técnica denominada SC-FDMA, ambas técnicas aportan ortogonalidad en ambos enlaces, presentan una gran robustez ante la propagación multitrayecto y permiten una asignación de recursos ajustada al estado del canal. Al final se describen la estructura de transmisión y recepción con múltiples antenas [5], [7].

1.2.1 OFDMA

La técnica de acceso múltiple OFDMA que se utiliza en el enlace descendente en el sistema LTE, ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, es posible acomodar varias

transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.

Se consigue que un conjunto de usuarios puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad [3]. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí, que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. En la Figura 1.2 se observa una representación del espectro de OFDMA.

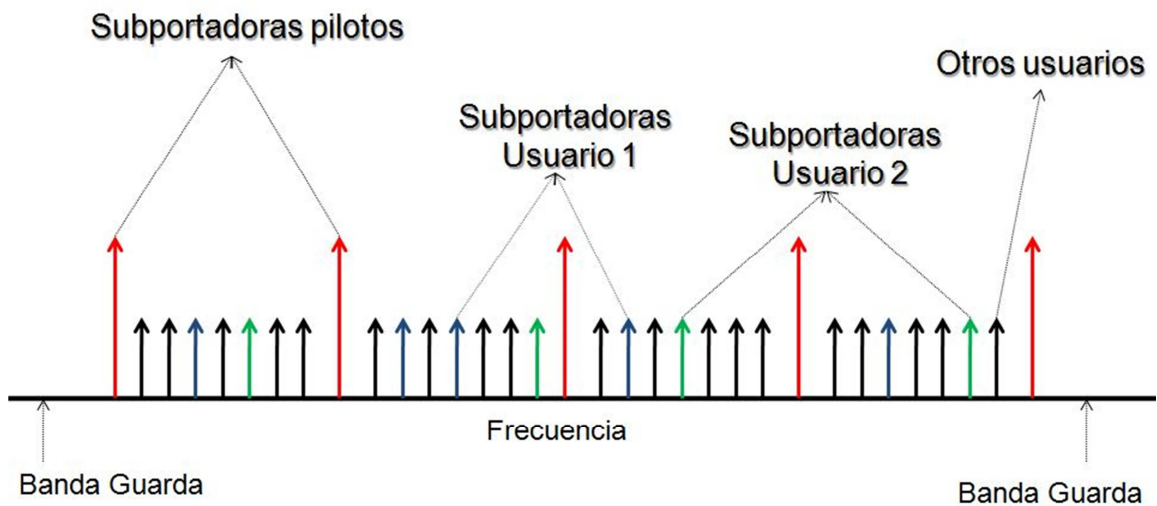


Figura 1.2 Espectro de OFDMA

Hay que destacar que no es necesario que las subportadoras estén contiguas, los símbolos de un usuario pueden estar distribuidos sobre subportadoras no contiguas.

Las subportadoras pilotos no son usadas para datos, en estas se envían secuencias conocidas o pseudoaleatorias codificadas con modulaciones de bajo orden como BPSK o QPSK, los pilotos tienen diversas utilidades, entre ellas el facilitar la sincronización y la estimación del canal, así como la detección de desplazamientos en fase y frecuencia [1], [3].

Ventajas de OFDMA

Entre las ventajas de OFDMA se encuentran las siguientes:

- **Diversidad multiusuario:** la asignación de subportadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal de radio presentará desvanecimientos aleatorios en las

diferentes subportadoras, y que serán independientes de cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada subportadora aquel usuario que presente un mejor estado del canal, es decir, el que perciba una mejor relación señal a ruido. Con esto se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. A esta manera de actuar se le denomina “*scheduling*” (programación).

- **Diversidad de frecuencias:** es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas suficientemente como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad de frecuencia en la transmisión de dicho usuario en presencia de canales selectivos en frecuencia.

- **Robustez frente al multitrayecto:** gracias a la utilización del prefijo cíclico, esta técnica es muy robusta frente a la interferencia intersímbolos ISI (*Inter-symbolic Interference*), resultante de la propagación multitrayecto y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan menos complejas que las que se realizan en el dominio del tiempo.

- **Flexibilidad en la banda asignada:** esta técnica de acceso múltiple proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de la cantidad de información a transferir requeridas por cada usuario, simplemente asignando más o menos subportadoras a cada usuario.

- **Elevada segmentación en los recursos asignables:** al subdividir la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, con lo que ayudará a acomodar servicios con diferentes requisitos de calidad.

- **Elevado grado de utilización de la banda asignada:** gracias a la utilización de la transmisión OFDM, la transmisión multiportadora se consigue con una separación mínima entre subportadoras, existiendo una superposición.

- **Sencillez de implementación digital:** gracias al uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT e IFFT).

Desventajas de OFDMA

Entre las desventajas de OFDMA se encuentran las siguientes:

-Sensibilidad al desplazamiento de portadora: El hecho de tener las subportadoras muy próximas hace que un desplazamiento en frecuencia de las subportadoras lleve a producir errores [10].

-Elevada relación potencia pico a potencia promedio (PAPR, Peak to Average Power Ratio): En la señal OFDM se generan picos de tensión muy grandes que implican distorsión en la señal al pasar por un dispositivo no lineal como es el amplificador de potencia de RF de salida, a menos que se trabaje en una zona lineal que resulta extremadamente ineficiente desde el punto de vista energético. La señal OFDM, modulada con un gran número de portadoras, es muy sensible a la distorsión no lineal debido a la gran variabilidad de su envolvente, la cual depende del valor de fase instantáneo de cada portadora, lo cual comúnmente se expresa como un alto nivel de PAPR, parámetro que relaciona los valores máximo y promedio de la señal temporal.

Esto requiere que los amplificadores usados sean muy lineales y tengan un rango dinámico muy grande, ya que el amplio rango de amplitudes que puede emplear la señal dificulta considerablemente un punto de trabajo óptimo para todas ellas.

Lo ocurrencia de los picos en la señal es debido a la posibilidad de que todas las portadoras se puedan sumar en fase en un momento dado, consiguiendo una contribución de potencia muy importante. Si bien es muy improbable que se produzca una coincidencia en fase tan mayoritaria de las portadoras, la posibilidad de que haya un pico importante y la magnitud de este pico son causas suficientes para disparar la dispersión de las amplitudes de una señal OFDM.

Todo esto hace que la falta de linealidad en los amplificadores recorte la amplitud de los picos más importantes de una señal OFDM. Estos recortes suponen cambios bruscos en la amplitud de la señal, lo que se traduce en componentes de alta frecuencia, que hacen que se ensanche el espectro de OFDM, produciendo finalmente Interferencia Interportadora (*ICI, Inter Carrier Interference*) [11].

1.2.2 SC-FDMA

SC-FDMA es una técnica de modulación híbrida que combina las ventajas de los sistemas OFDMA, como la flexibilidad en la elección de las subportadoras y la robustez ante la propagación multitrayectoria, con una PAPR mucho menor en comparación a la del sistema OFDMA y que es característico de las modulaciones de portadora única. Esta combinación de características fue la razón para elegirla como técnica de acceso múltiple

en el enlace ascendente del sistema LTE, especialmente la última ya que al ser una técnica utilizada en el terminal móvil no es posible requerir amplificadores que consuman mucha potencia y que como consecuencia reduzcan la duración de la batería del equipo.

SC-FDMA se basa en unos principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero en este caso se efectúa una precodificación de los símbolos que se van a transmitir previo al proceso de transmisión OFDM, lo que permitirá reducir las variaciones en la potencia instantánea [2], [3].

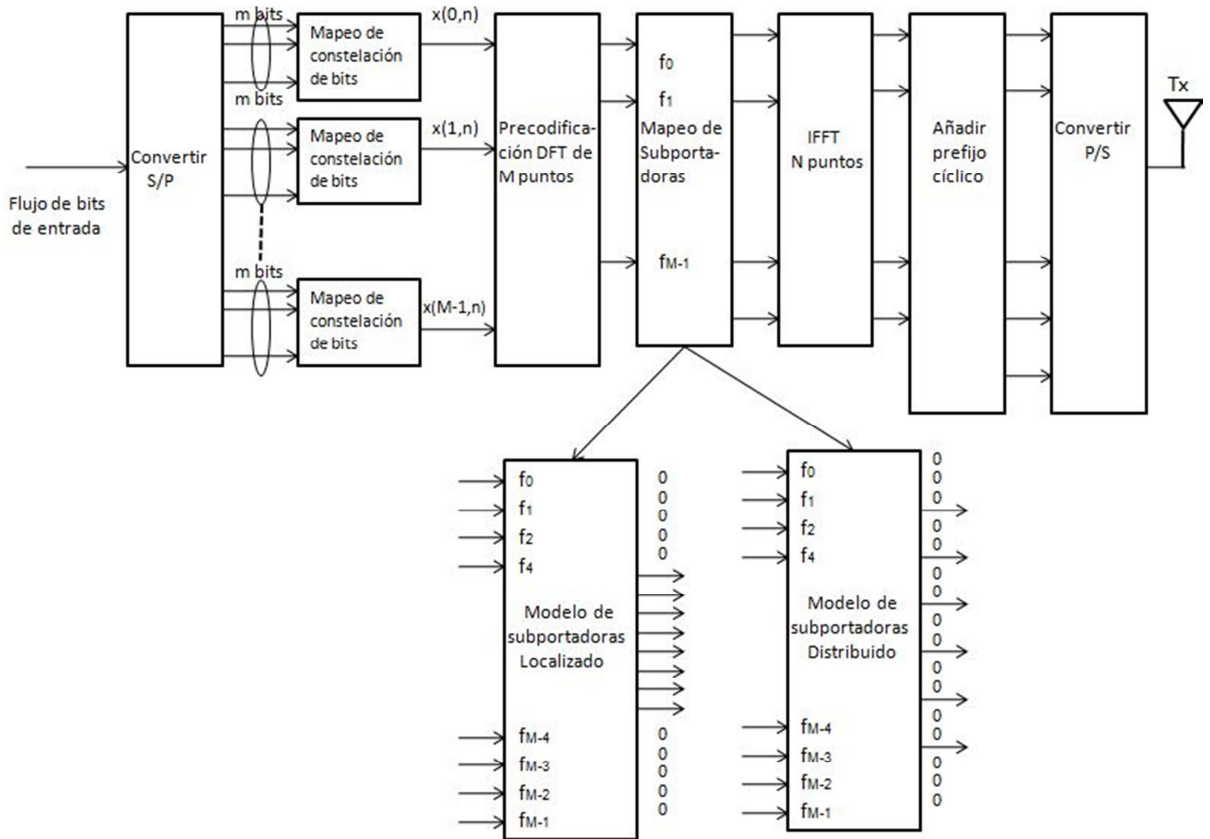


Figura 1.3 Esquema de transmisión SC-FDMA localizado y distribuido, (Tomada y modificada de: [3])

Como se muestra en la Figura 1.3, existen M símbolos a transmitir, los cuales se precodifican mediante una DFT (*Discrete Fourier Transform*) de M muestras, como paso previo a efectuar una transmisión OFDM de acuerdo a una IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) de N muestras, con una separación entre subportadoras Δf , y con el correspondiente prefijo cíclico.

Debido al proceso de precodificación basado en DFT, esta técnica también se denomina DFT-Spread OFDM (*DFTS-OFDM*).

En el esquema mostrado, si el tamaño de la DFT, M , fuera igual al de la IDFT, N , los procesos de DFT y IDFT se cancelarían entre sí, sin tener ningún efecto, por lo que la señal enviada sería simplemente el mismo conjunto de símbolos original, resultando una señal en banda base, es decir, una señal de portadora única (*single carrier*) que presentaría mejores propiedades de PAPR que las señales multiportadora.

Sin embargo, siempre que $M < N$ y el resto de entradas al bloque IDFT están puestas a cero, el resultado de este proceso será una señal que continúa teniendo la propiedad de ser de portadora única, y cuyo ancho de banda $B = M \cdot \Delta f$ es regulable simplemente cambiando el valor de M . Esto permitirá tener una flexibilidad en la banda asignada.

Se observa en el esquema presentado en la Figura 1.3, que se puede no ubicar las M muestras de salida de la DFT de forma contigua, sino distribuir las en entradas equidistantes de la IDFT, ubicando ceros en las posiciones intermedias. A este modelo se le denomina SC-FDMA distribuido, a diferencia del anterior, que se denomina "localizado". El modelo distribuido proporciona una mayor diversidad de frecuencias ya que la señal se distribuye entre portadoras separadas.

Se destaca también cómo en el mecanismo de multiplexación de transmisión de diferentes usuarios en SC-FDMA para el enlace ascendente, manteniendo los mismos parámetros a nivel de número de muestras de la IDFT, N , frecuencia de muestreo y separación entre subportadoras, las transmisiones de los dos usuarios vienen ubicadas en diferentes entradas de la IDFT, de modo que en las posiciones de entrada en las que se ubica la transmisión del usuario 2, el usuario 1 inyecta ceros (y viceversa), se observa esta característica en la Figura 1.4. Como resultado, se obtienen dos transmisiones que ocupan bandas de frecuencias diferentes. Mediante DFTs de diferentes tamaños se obtienen diferentes anchos de banda asignados a cada usuario [2].

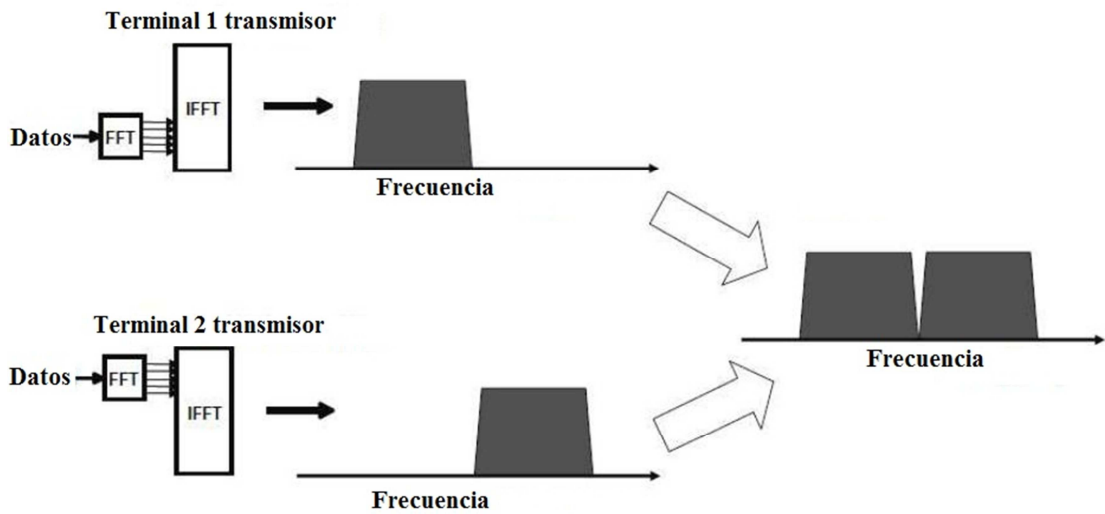


Figura 1.4 Multiplexación de usuarios con SC-FDMA

En OFDMA los símbolos se transmiten en paralelo mientras que en SC-FDMA los símbolos se envían en serie. Como se puede observar en la Figura 1.5 la señal multiportadora correspondiente a OFDMA mientras que en SC-FDMA las señales juntas parecen como una sola portadora, de ahí su nombre. Esta característica hace que el PAPR sea menor por lo que representa menos consumo energético y por lo tanto mejor para las condiciones del enlace ascendente [12].

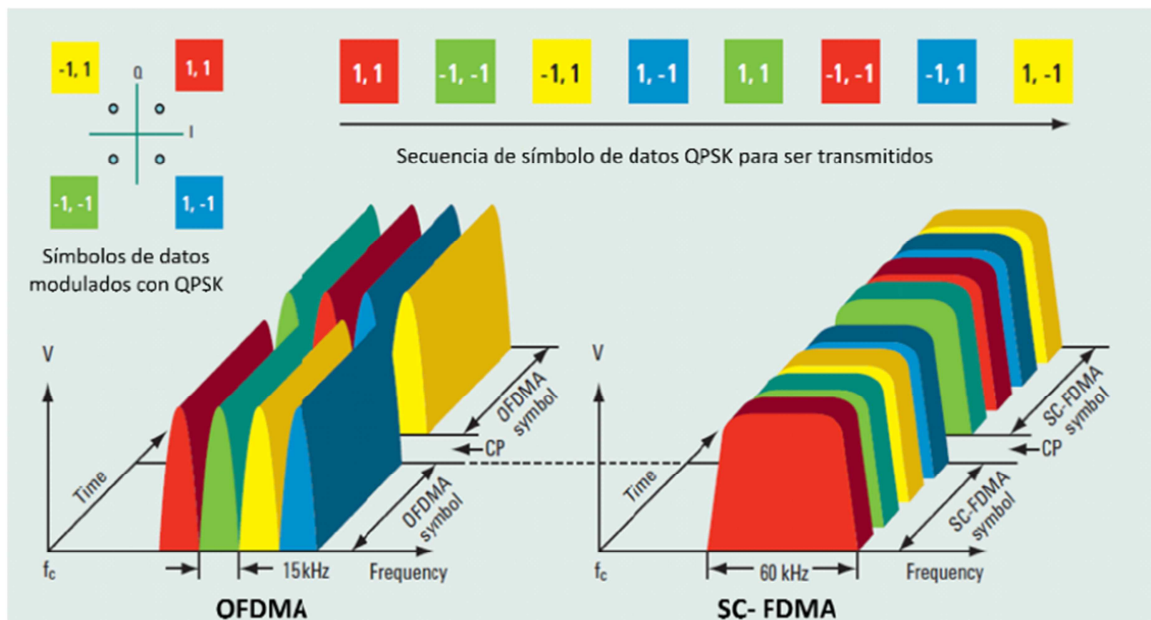


Figura 1.5 Comparación OFDMA y SC-FDMA con Modulación QPSK (Tomada de [12]).

1.2.3 MIMO

El sistema MIMO utiliza múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a las reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal en cada antena es una combinación lineal de las tramas de datos que fueron transmitidas.

En un sistema MIMO de M antenas transmisoras y N antenas receptoras, sistema $M \times N$, se generan $M \times N$ subcanales entre el arreglo transmisor y el arreglo receptor. La respuesta al impulso de un canal MIMO en banda estrecha se expresa en forma matricial como:

$$H(t) = \begin{bmatrix} H_{11}(t) & H_{12}(t) & \dots & H_{1N}(t) \\ H_{21}(t) & H_{22}(t) & \dots & H_{2N}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{M1}(t) & H_{M2}(t) & \dots & H_{MN}(t) \end{bmatrix} \quad (1 - 1)$$

Cada uno de los elementos $H_{ij}(t)$ (respuesta a impulso) representa el canal generado entre la antena transmisora i , con $i = 1, 2, \dots, M$ y la antena receptora j , con $j = 1, 2, \dots, N$.

Las altas velocidades de transmisión de los sistemas MIMO dependen de diversos factores que mejoran los esquemas de transmisión y la fiabilidad del enlace [13].

Los primeros, como por ejemplo la multiplexación espacial, utilizan múltiples antenas para generar subcanales paralelos por los que se transmiten flujos de información independientes. La mejora obtenida a partir de estos sistemas se denomina ganancia por multiplexación espacial. Los segundos factores mejoran las características del canal minimizando la probabilidad de error y mejorando la relación señal a ruido, lo que permite el uso de velocidades de transmisión más altas a través de esquemas de codificación superiores.

Las tramas de datos se separan en el receptor usando algoritmos que se basan en estimaciones de todos los canales entre el transmisor y el receptor. Además de permitir que se multiplique la tasa de transmisión al tener más antenas [2].

MIMO presenta varias ventajas entre ellas están:

Ganancia por diversidad espacial: al transmitir y recibir por varias antenas simultáneamente, se puede mejorar la fiabilidad del enlace, aminorando los desvanecimientos y disminuyendo la probabilidad de error. Si los $M \times N$ enlaces del canal MIMO sufren desvanecimientos de manera independiente y la señal transmitida se construye de una manera adecuada, el receptor puede combinar las señales recibidas de tal forma que la resultante compense en gran medida los desvanecimientos del canal SISO (*Simple Input Simple Output*), mejorando así la relación señal a ruido de la señal recibida.

Como en el receptor se recibirán varias versiones de la señal, el incremento del número de copias independientes aumenta. Con ello la probabilidad de que al menos una copia no experimente profundos desvanecimientos también aumenta, mejorando la fiabilidad en recepción. Para un enlace con M antenas transmisoras y N antenas receptoras, existirán $M \times N$ enlaces independientes entre sí y por lo tanto una diversidad espacial de $M \times N$.

Ganancia por multiplexación espacial: La multiplexación espacial consiste en la transmisión de flujos de información independientes por las diferentes antenas de manera simultánea. El multiplexado de la información en K canales consigue, en teoría, aumentar la velocidad global de transmisión de datos en un factor K , sin mayores requerimientos de potencia ni ancho de banda, consiguiendo una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal.

Ganancia de arreglo: La ganancia de arreglo se obtiene a través del procesado de las señales en el transmisor y en el receptor. Combinando coherentemente la señal en el transmisor o en el receptor se consigue un aumento de la relación señal a ruido media recibida, empleándose para maximizar la ganancia de la antena en la dirección del receptor/transmisor o para suprimir una señal interferente dominante específica. En ocasiones la ganancia en arreglo también se conoce como ganancia por conformación del haz.

En la Figura 1.6 se muestran los elementos básicos de un sistema MIMO con M antenas transmisoras y N antenas receptoras

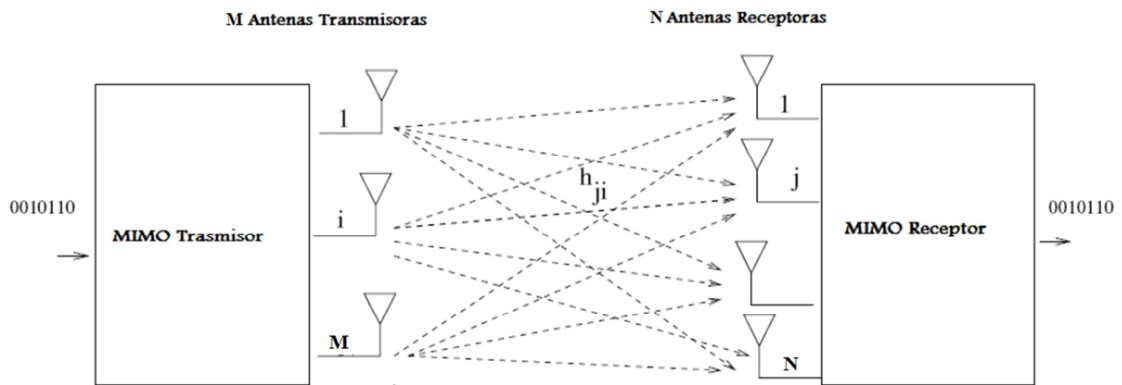


Figura 1.6 Sistema MIMO

La teoría de la capacidad para canales inalámbricos, extiende el límite del teorema de Shannon, en el caso de la utilización de esta tecnología. Este resultado teórico prueba que la capacidad de transmisión de datos y rango de alcance de los sistemas inalámbricos MIMO se puede incrementar sin usar más espectro de frecuencias. Este aumento es de carácter indefinido, simplemente utilizando más antenas en transmisión y recepción [2].

1.3 Conceptos importantes de la interfaz radio

En este subepígrafe se explican características importantes de la interfaz de radio lo que ayudará a entender mejor la posterior implementación de los enlaces físicos descendente y ascendente.

1.3.1 Capa física

La capa física de la interfaz de radio del sistema LTE se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente [1]. En los dos casos, la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 kHz. En la Tabla 1.1 se muestra el número de subportadoras en la canalización del sistema LTE.

La capa física del sistema LTE está diseñada para que opere en las bandas altas de UHF, es decir, por encima de los 450 MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación para trabajar en modo dúplex por división en frecuencia (FDD) o en modo dúplex por división en el tiempo (TDD).

Tabla 1.1 Canalización del sistema LTE (Fuente: [2])

| | | | | | | |
|--------------------------------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Canalización | 1,4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| Tamaño FFT | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1536 | 2048 |
| Números de subportadoras disponibles | 73 | 181 | 301 | 601 | 901 | 1201 |

Los posibles esquemas de modulación para el enlace descendente y ascendente son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM, dependiendo de la capacidad del terminal móvil.

Si se utilizan técnicas MIMO (2x2, esto es, 2 antenas en el transmisor y 2 antenas en el receptor) y una canalización de 20 MHz se podría alcanzar una velocidad de transmisión pico a nivel de capa física de 150 Mbps en el enlace descendente y de 75 Mbps en el ascendente.

1.3.2 Bloque de recursos físicos (Physical Resource Block)

Se denomina PRB, al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180 kHz de banda equivalente a 12 subportadoras igualmente espaciadas 15 kHz entre ellas y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0,5 ms, que es la duración de una ranura de tiempo o “time slot”, esto se muestra en la Figura 1.7. En la Tabla 1.2 se aprecia la cantidad de PRBs en función del canal empleado.

Tabla 1.2 Número de PRBs en función de la canalización (Fuente: [2]).

| | | | | | | |
|---------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Canalización | 1,4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| Número de PRB | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

Se debe destacar que el número de portadoras disponibles (Tabla 1.1) está relacionado con el número de PRBs en cada canal. Por lo tanto, el número de subportadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que se considera la subportadora central (la de DC) que no se utiliza para transmitir información [2].

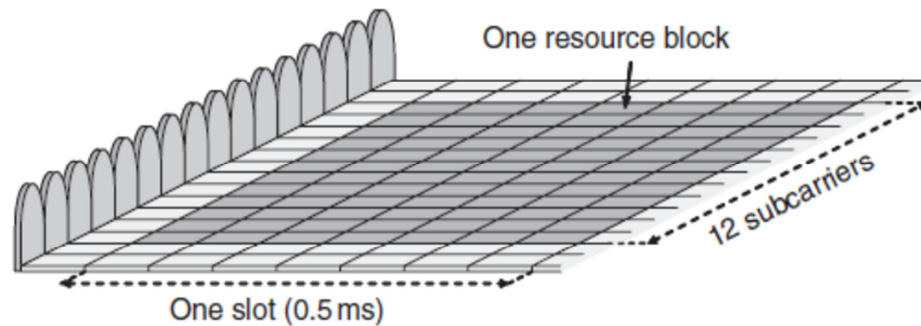


Figura 1.7 PRB de 7 símbolos con 12 subportadoras, tomada de [2].

En un PRB se tienen 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que se tiene en total 84 recursos donde introducir los símbolos QPSK, 16QAM y 64QAM. Considerando la modulación de mayor eficiencia espectral, 64QAM en la que se transmiten 6 bits/símbolo, dentro de un PRB se puede enviar un total de 504 bits cada 0,5 ms, lo que ofrece una velocidad bruta de transmisión de pico de aproximadamente $R_{b,PRB} = 504 \text{ bits}/0,5 \text{ ms} \approx 1 \text{ Mbps}$.

Tabla 1.3 Velocidades pico en función de la canalización (Fuente: [2])

| Canalización | 1,4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
|---|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Velocidad de pico total (Mbps) | ≈ 6 | ≈ 15 | ≈ 25 | ≈ 50 | ≈ 75 | ≈ 100 |
| Velocidad de pico bruta de usuario (Mbps) (15% de los recursos destinados a control y señalización) | ≈ 5,1 | ≈ 12,8 | ≈ 21 | ≈ 42,5 | ≈ 63,7 | ≈ 85 |

1.3.3 Estructura de la trama

En el dominio del tiempo los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos tipos de estructuras de trama, de tipo 1 y de tipo 2 [1], el trabajo se centrará en la de tipo 1 ya que es la que utiliza el modo de dúplex por división de frecuencia (FDD) que se utiliza en la implementación.

Estructura de trama de tipo 1

Se utiliza tanto para el enlace descendente como para el ascendente y soporta semi y full-dúplex FDD. La trama de tipo 1 se divide en tramas de 10 ms y cada trama está a su vez compuesta por 20 ranuras temporales (slot) de duración 0,5 ms. Se define una unidad básica de recursos, formada por dos ranuras temporales que se denomina “subtrama” de duración 1 ms. En la Figura 1.8 se muestra esta estructura

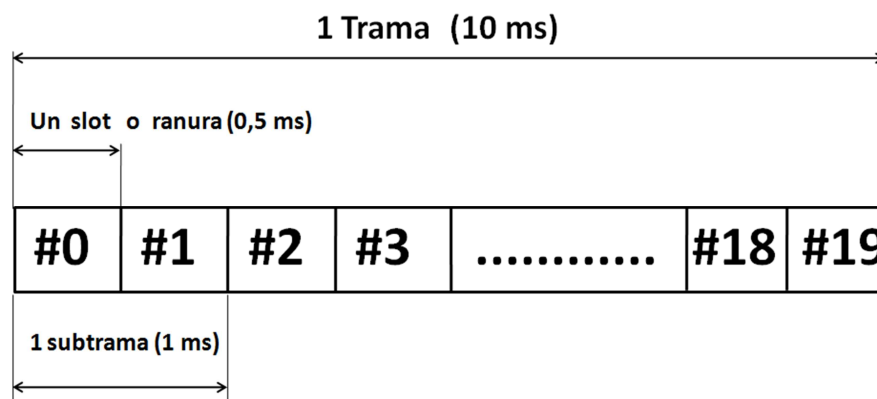


Figura 1.8 Estructura de la trama tipo 1

En cada ranura temporal se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM, cada uno de ellos de duración $T_s = 66,7 \mu s$. Si se usan 7 símbolos, el prefijo cíclico “corto”, tiene una duración de $4,7 \mu s$, salvo para el primer símbolo, que tiene un prefijo cíclico de $5,2 \mu s$. En el caso de utilizar 6 símbolos por ranura temporal entonces el prefijo cíclico “extendido”, tiene una duración de $16,67 \mu s$. En el caso de que la celda sea muy grande se utilizan 6 símbolos, ya que el retardo de propagación suele ser del orden de los microsegundos y se requiere un prefijo cíclico mayor para compensar la propagación multitrayecto.

1.3.4 Enlace descendente

Se describe en este subepígrafe las principales características de las señales físicas que permiten al terminal móvil sincronizarse al sistema y demodular coherentemente las señales OFDMA. A continuación se verán también los canales físicos utilizados para

transportar la información destinada a los usuarios situados en la zona de cobertura correspondiente a una estación base (eNB) [4].

Señales Físicas

RS (Señales de referencia)

Se utilizan para:

- Obtener medidas de calidad en el enlace descendente.
- Estimar la respuesta a impulso del canal para demodulación/detección coherente.
- Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.

Las señales de referencia se sitúan en determinados recursos elementales (subportadoras o símbolos) y mantienen una separación en el dominio de la frecuencia de seis subportadoras. Como mínimo se necesitan dos señales de referencia por PRB denominadas señales de referencia primaria (RSP, *Reference Signal Primary*). Estas señales de referencia primarias están ubicadas en el primer símbolo de una ranura temporal (TS, *Temporal Slot*). Si las condiciones del canal de radio lo requieren puede ubicarse un segundo grupo de señales piloto o de referencia, denominadas señales de referencia secundarios (RSS, *Reference Signal Secondary*), típicamente situadas en el quinto símbolo de una ranura temporal (TS). En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo típico de la ubicación de las señales de referencia primarias y secundarias dentro de una subtrama genérica, compuesta por dos bloques de recursos físicos (PRBs). [1]

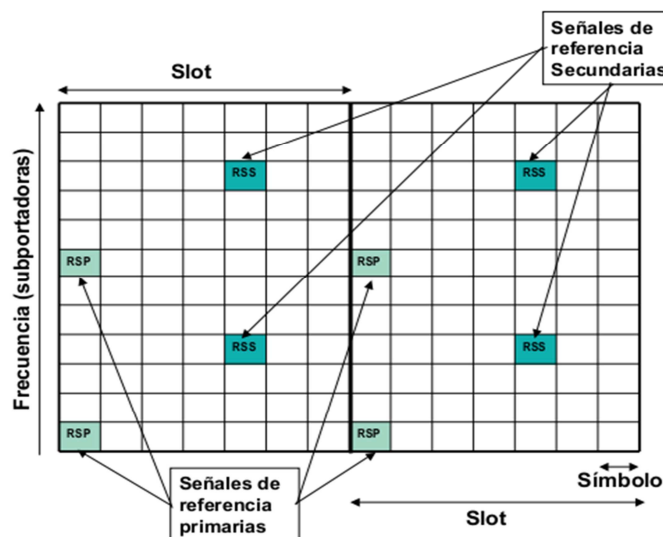


Figura 1.9 Ubicación de las señales de referencia primarias y secundarias

SCH (Señales de Sincronización)

Se utilizan para facilitar los procesos de sincronización temporal del sistema (a nivel de trama y subtrama). Se dividen en dos:

- P-SCH (*Primary SCH*): permite la sincronización temporal a nivel de subtrama
- S-SCH (*Secondary SCH*): posibilita la sincronización temporal a nivel de trama

Canales físicos de tráfico

PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*)

Este canal transmite habitualmente información de usuario. Contiene la información entregada por la capa MAC (*Media Access Control*) mediante el canal de transporte Downlink Shared Channel (DL-SCH). También puede transportar información de aviso y aquella de radiodifusión que no sea imprescindible para que el terminal móvil se conecte a la red. Este canal se mapea en los dominios del tiempo y la frecuencia utilizando los PRBs.

Canales de Control

PBCH (*Physical Broadcast Channel*)

Transporta la información de radiodifusión básica de la red, que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la misma.

PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*)

Canal de control genérico del enlace descendente. Informa sobre los recursos en el enlace descendente asignados al PDSCH.

PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*)

Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos (1,2 ó 3) utilizados para transmitir el PDCCH.

PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*)

Transporta información de reconocimiento (ACK/NACK) correspondientes a las transmisiones del enlace ascendente [1].

1.3.5 Enlace ascendente

En este subepígrafe se describen brevemente las características más relevantes de los canales físicos especificados para el enlace ascendente en el sistema LTE. Como en el caso del enlace descendente se distingue entre canales físicos de tráfico compartidos y canales físicos de control, utilizados para transportar tanto señales de control generadas en la capa física del sistema como los mensajes de control generados en las capas superiores del sistema [3].

PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)

Es el canal utilizado para enviar la información de usuario. Se transmite utilizando señales SCFDMA durante una o varias subtramas. El número de subportadoras utilizadas lo determina el gestor de recursos de radio (*scheduler*) del enlace ascendente. Esta asignación la hace el eNB y se transmite al terminal móvil mediante el canal PDCCH. Los esquemas de modulación considerados son: QPSK, 16QAM y 64QAM.

Es importante subrayar que el canal PUSCH no es un canal dedicado, sólo se asigna al usuario cuando éste tiene algo que transmitir en el enlace ascendente, de acuerdo con un cierto algoritmo de “*scheduling*”, y en base a las peticiones que dicho usuario haga a través del canal de control PUCCH descrito a continuación

Canales de control

Por lo que respecta a los canales físicos de control del enlace ascendente, se clasifican en:

1. PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*)
2. PRACH (*Physical Random Access Channel*)

PUCCH (Physical Uplink Control Channel)

Contiene información de control del enlace ascendente. En particular puede transmitir las siguientes informaciones de control:

- Peticiones de asignación de recursos (*Scheduling Request*).
- Reconocimientos (ACK/NACK) para el mecanismo de retransmisión híbrido (HARQ) de paquetes en el enlace descendente.

- Información de la calidad del canal (*CQ-Channel Quality Indicator*) necesaria para optimizar los procedimientos de asignación de recursos radio en el enlace descendente. De forma general cabe indicar que el canal PUCCH se ubica en los extremos de la banda asignada al sistema, tal como se muestra en la Figura 1.10, donde se muestra un ejemplo con cuatro canales PUCCH (numerados de 0 a 3), cada uno de ellos ocupando un (PRB). Esta ubicación impone pocas limitaciones en la asignación de recursos en el enlace ascendente y permite que el canal de datos de usuario (PUSCH) pueda ocupar toda la parte central de la banda disponible. Además, con el fin de dotarle de un mecanismo de diversidad en frecuencia, que le proporcione robustez frente a desvanecimientos, los canales PUCCH aparecen duplicados (es decir se envía la misma información) y su posición intercambiada entre la primera y segunda ranuras temporales de la subtrama, tal como se indica en la Figura 1.10. La ganancia aportada por este mecanismo de diversidad en frecuencia es del orden de 2 dB [3], [5].

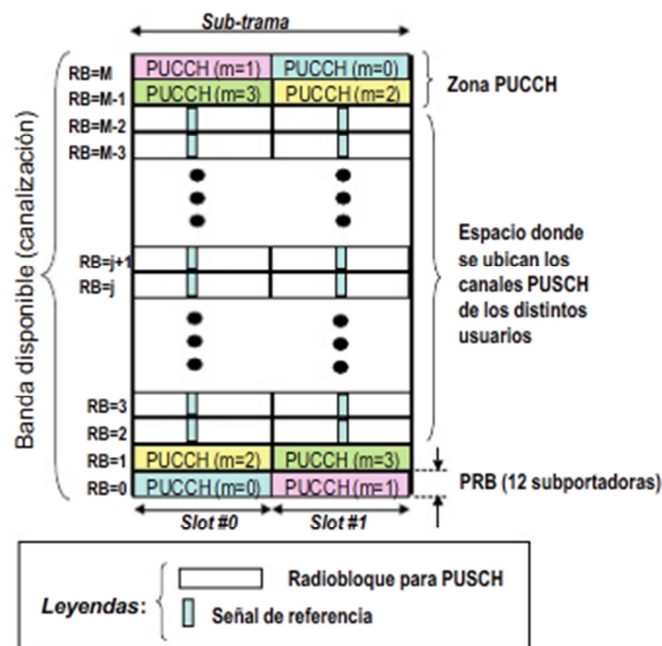


Figura 1.10 Ejemplo de ubicación de los canales PUCCH dentro de la banda de canalización del sistema, (Fuente: [3])

El número de PRBs utilizados para transmitir el canal PUCCH depende de la canalización usada. En la Tabla 1.4 se indican valores típicos para las diferentes canalizaciones estandarizadas.

Tabla 1.4 Número de PRBs típico asignados al canal PUCCH

| Canalización (MHz) | Número de PRBs asignados | Número de canales PUCCH |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1,4 | 2 | 1 |
| 3 | 4 | 2 |
| 5 | 8 | 4 |
| 10 | 16 | 8 |
| 20 | 32 | 16 |

Se puede observar como el número de PRBs es el doble del número de canales PUCCH transmitidos y esto se debe al mecanismo de diversidad en frecuencia.

En un canal PUCCH es posible transmitir información de control de múltiples usuarios simultáneamente, para ello se utiliza una técnica de multiplexación ortogonal por división de código, tanto en frecuencia como en tiempo para mezclar las diferentes informaciones de señalizaciones transmitidas.

El canal PUCCH utiliza típicamente modulación BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) y QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*) y se transmite utilizando diferentes tipos de formato [3], [4], tal como se indica en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Configuración del canal PUCCH

| Formato del canal PUCCH | Esquema de modulación | Número de bits por subtrama | Tipo de información transmitida |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| 1 | ON/OFF | | Petición de asignación de recursos (<i>scheduling</i>) |
| 1a | BPSK | 1 | 1 bit ACK/NACK para HARQ |
| 1b | QPSK | 2 | 2 bit ACK/NACK para HARQ |

| | | | |
|----|-------------|----|--|
| 2 | QPSK | 20 | CQI (20 bits codificados) |
| 2 | QPSK | 20 | CQI más 1 ó 2 bits ACK/NACK para prefijo cíclico largo |
| 2a | BPSK + QPSK | 21 | CQI (20 bits) más 1 bits ACK/NACK |
| 2b | BPSK + QPSK | 22 | CQI (20 bits) más 2 bits ACK/NACK |

.PRACH (Physical Random Access Channel)

El canal físico de acceso aleatorio consta de un prefijo cíclico y un preámbulo. El propósito de este canal es configurar la llamada [3].

En este capítulo se realizó un estudio de los fundamentos teóricos de LTE, haciendo énfasis en los aspectos relacionados con la capa física de los enlaces descendentes y ascendentes, esto demuestra las grandes ventajas que presenta esta tecnología como la sencillez de su arquitectura, el aumento de la tasa de datos en comparación con estándares anteriores, el uso eficiente del espectro y otros, motivo por el cuál en el próximo capítulo se realizará la implementación de los enlaces LTE partiendo de las características exhibidas en el presente capítulo.

CAPITULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE ENLACES LTE

La simulación es la etapa que necesariamente se tiene que realizar para evaluar el funcionamiento de un sistema previo a su implementación real, para ello se escogió el Matlab en su versión 8.3.0.532. En este capítulo se implementan los enlaces descendente y ascendente de LTE, se presentan los esquemas en bloques, las funciones de *LTE System Toolbox* y los parámetros que se emplean en la realización de ambos enlaces.

2.1 LTE System Toolbox para MATLAB

Matlab en su versión 8.3.0.532 ha presentado su nuevo sistema de herramientas LTE para la simulación, la comprobación y el análisis, en conformidad con el estándar, de sistemas y dispositivos de comunicaciones inalámbricas LTE y LTE - Avanzado. Estas herramientas son una extensión para MATLAB y *Communications System Toolbox* y está destinada al uso por parte de ingenieros que deban diseñar y comprobar sistemas inalámbricos según el estándar LTE [2], [6], [13].

Conforme el estándar LTE, se hace cada vez más complejo garantizar la corrección del diseño y su implementación supone un importante desafío para los desarrolladores de componentes y dispositivos LTE en diversos mercados inalámbricos (comercial, militar, seguridad y seguridad pública). Es preciso someter a pruebas dichos productos con objeto de garantizar su conformidad con el estándar, pero el desarrollo de las pruebas resulta caro y esto es una de las razones por la que surge el *LTE System Toolbox* y mediante este se pueden implementar modelos de referencia validados [2], [13].

LTE System Toolbox proporciona modelos de referencia y formas de onda de prueba LTE y LTE - Avanzado, en conformidad con el estándar, que aportan lo siguiente:

- **Reducción de riesgos:** ofrece la seguridad de que el diseño cumple el estándar LTE.
- **Ahorro de tiempo:** reduce los requisitos de desarrollo de herramientas a nivel interno.

- **Comprensión y reutilización:** facilita la comprensión del estándar, la exploración de los diseños y la reutilización durante el desarrollo y la implementación de los componentes.

“A medida que crece el mercado para la tecnología LTE, los ingenieros necesitan comprobar que sus diseños de productos cumplen, o pueden coexistir, con el estándar LTE y LTE - Avanzado”, ha afirmado Ken Karnofsky, estrategia superior para aplicaciones de procesamiento de señales de MathWorks. “Asimismo, dado que LTE es extremadamente complejo y sigue evolucionando, muy pocas empresas tienen los recursos o la experiencia para hacer esto de forma interna. *LTE System Toolbox* ayudará a los equipos a conseguir la conformidad con el estándar sin llevar a cabo una gran inversión en ingeniería” [6].

2.2 Implementación del enlace descendente

En la generación de la trama se procede a especificar todos los parámetros de la simulación en cuanto a las características del enlace y del canal, se generan las sincronizaciones primarias y secundarias así como las señales de referencia, luego la trama se modula con OFDM y se pasa a través de un canal de desvanecimiento agregándole ruido blanco gaussiano, la información se demodula y finalmente se analiza el comportamiento del enlace mediante la magnitud del vector error y la BER (*Bit Error Rate*), este proceso se muestra en el esquema en bloques de la Figura 2.1

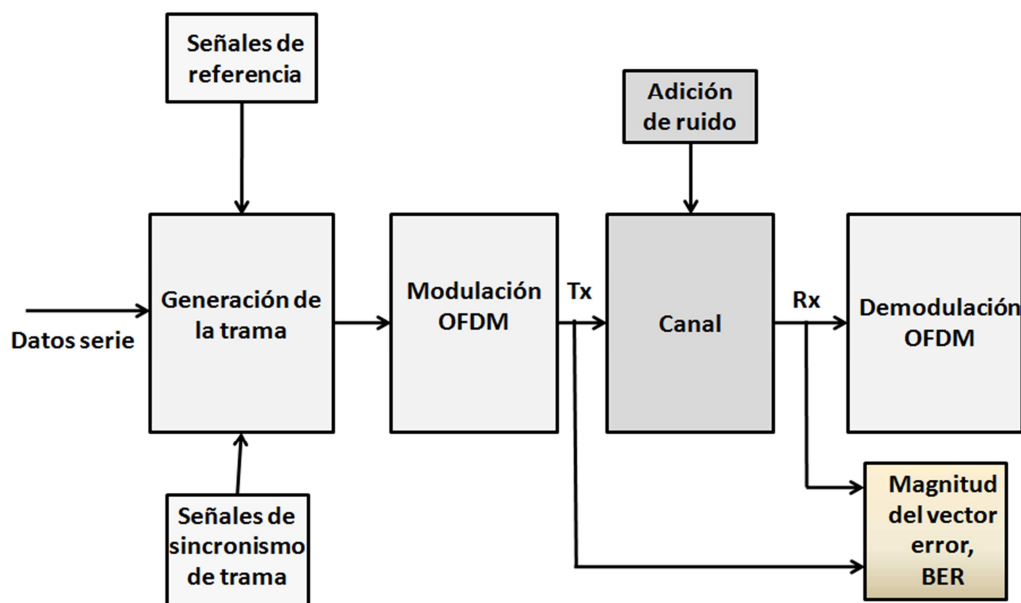


Figura 2.1 Diagrama en bloques del enlace descendente

2.2.1 Funciones del LTE System Toolbox utilizadas en el enlace descendente

Las funciones y estructuras del *LTE System Toolbox* que se utilizan en cada bloque de la simulación del enlace descendente son las siguientes:

Generación de la trama

- Estructura userdown

Se utiliza para especificar los parámetros que caracterizan la amplitud de las celdas, parámetros que son comunes para todos los usuarios dentro de una misma célula, estos son, el número de bloques de recurso (*PRB*), cantidad de antenas transmisoras, identificación o número de las celdas, número de subtramas, prefijo cíclico que puede ser normal o extendido y el modo dúplex que puede ser TDD o FDD que es el empleado.

- Estructura canal

Mediante esta se lleva a cabo la configuración del modelo del canal en la que se especifica el número de antenas receptoras, la frecuencia Doppler, se inicializa el tiempo en cero, el tipo de modelo de canal que en este caso es *Extended Vehicular A* (EVA), la fase inicial, el tipo de desvanecimiento experimentado que es el de Rayleigh, la demora que introduce el canal, entre otros.

- lteDLResourceGridSize (userdown)

Esta función devuelve un vector fila de tres elementos, que se usa para representar los recursos de una subtrama y se aplicarán tantas veces como antenas transmisoras existan, representando una estructura de datos, la primera posición representa el número de subportadoras que sería $12 \times \text{número de PRB}$, la segunda el número de símbolos OFDM (14 para prefijo cíclico normal y 12 para prefijo cíclico extendido) y la tercera el número de antenas transmisoras. Estos tres elementos se obtienen de los parámetros introducidos en la estructura "userdown".

- lteSymbolModulate (inputBits,'modulación')

Esta función devuelve un vector columna que contiene símbolos que son el resultado de modular los bits de entrada (*inputsBits*), con una modulación compleja que puede ser QPSK, 16QAM o 64QAM.

El número de bits que se introducen en *inputsBits* se calcula multiplicando el número de subportadoras, el número de símbolos por subportadora, el número de antenas y el número de bits necesarios para representar un símbolo según la modulación empleada: 2 para QPSK, 4 para 16QAM y 6 para 64QAM.

- *IteDLResourceGrid* (userdown)

Esta función devuelve un arreglo de 3 dimensiones vacío que se usa para representar los recursos de una subtrama para todas las antenas configuradas con una estructura como la explicada en *IteDLResourceGridSize* (userdown). Retorna un arreglo de recursos generado por la estructura userdown. Trabaja a nivel de subtrama y se usa para la conformación de la trama.

- *ItePSS* (userdown)

Esta función retorna un vector columna que contiene los valores de la señal de sincronización primaria (*PSS*) conforme a la estructura userdown. Esta señal solo se define para las subtramas de la 0 a la 5 con FDD de la 0 a la 6 con TDD y para las restantes se devuelve un vector vacío.

- *IteSSS* (userdown)

Esta función retorna un vector columna que contiene los valores de la señal de sincronización secundaria (*SSS*) conforme a la estructura userdown.

- *ItePSSIndices* (userdown)

Esta función retorna un vector columna con los índices de los elementos de la *PSS* utilizando la estructura userdown. Estos índices ordenan como los símbolos de la modulación de *PSS* tienen que ser mapeados.

- *IteSSSIndices* (userdown)

Esta función retorna un vector columna con los índices de los elementos de la *SSS* utilizando la estructura userdown. Estos índices ordenan como los símbolos de la modulación de *SSS* tienen que ser mapeados.

- lteCellRS (userdown)

Esta función devuelve un vector columna complejo que contiene la información de los símbolos de la señal de referencia conforme a la estructura userdown.

- lteCellRSIndices (userdown)

Esta función devuelve un vector columna con los índices de los recursos de la señal de referencia dado por la estructura userdown. Estos índices ordenan como los símbolos de la modulación de la señal de referencia tienen que ser mapeados.

Modulación OFDM

- [txWaveform, info] = lteOFDMModulate (userdown, txGrid);

Esta función se utiliza para realizar la modulación OFDM, emplea la IFFT para transformar del dominio de la frecuencia al del tiempo, inserta el prefijo cíclico y retorna 2 valores: txWaveform es una matriz que es el resultado en el dominio del tiempo, en cada columna contiene la información para cada antena e info contiene la frecuencia de muestreo para crear la forma de onda en el dominio del tiempo, este valor es necesario para su posterior empleo en el modelo del canal.

Canal

- lteFadingChannel (canal, txWaveform)

Esta función implementa un modelo de canal de desvanecimiento multitrayectoria MIMO que se configura con la estructura canal. El modelo del canal requiere el ritmo de muestreo de la señal en el tiempo por lo que se toma de info, la señal generada contiene tantas columnas como antenas receptoras posea y esta característica la obtiene de txWaveform.

-lteDLFrameOffset (userdown, rxWaveform)

Esta función devuelve el desplazamiento causado por el canal en la recepción de la señal obtenida, este valor indica cuantas muestras han sido demoradas. El desplazamiento se considera idéntico para las señales recibidas en todas las antenas.

Demodulación OFDM

-lteOFDMDemodulate (userdown, rxWaveform)

Esta función se utiliza para realizar la demodulación OFDM, emplea la FFT para transformar del dominio del tiempo al de la frecuencia, elimina el prefijo cíclico. El resultado es un matriz de 3 dimensiones (MxNxP) donde M es el número de subportadoras, N es el número de símbolos OFDM y P el número de antenas.

Magnitud del vector error

- lteEVM (rxGrid, txGrid)

Esta función retorna una estructura que contiene el valor eficaz, el valor pico y la información de la magnitud del vector error obtenida del vector de entrada rxGrid (vector recibido), tomando como referencia el vector txGrid (vector transmitido). La magnitud del vector error es la diferencia existente entre los valores de entrada, rxGrid y el vector de referencia txGrid.

2.2.2 Parámetros utilizados en el enlace descendente.

Para realizar el enlace descendente se definieron parámetros teniendo en cuenta los aspectos teóricos comentados en el capítulo anterior, estos se recogen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros del enlace descendente

| Parámetros | Valor |
|----------------------------|----------------------------|
| Número de PRB | 15 |
| Número de antenas | 1 |
| Número de subtramas | 10 |
| Prefijo cíclico | Normal |
| Ancho de banda | 2,5 MHz |
| Modo dúplex | Pareado (FDD) |
| SNR (dB) | 10 |
| Frecuencia Doppler | 70 Hz |
| Modulación de los símbolos | QPSK, 16QAM o 64QAM |
| Número de subportadoras | 181 |
| Tamaño de la FFT | 256 |
| Símbolos por trama | 14 |
| Modelo de canal | Extended Vehicular A (EVA) |

| | |
|-------------------------|----------|
| Tipo de desvanecimiento | Rayleigh |
|-------------------------|----------|

2.3 Implementación del enlace ascendente

En la generación de la trama se procede a especificar todos los parámetros de la simulación que en este caso se configuran las características de un usuario, el canal PUCCH con formato 1 y el canal de transmisión, se genera la señal de referencia con sus respectivos índices en el bloque de mapeo, luego se emplea SCFDMA para la modulación de la trama y se pasa a través de un canal de desvanecimiento agregándole ruido blanco gaussiano, la información se demodula y finalmente se analiza el comportamiento del enlace mediante la magnitud del vector error (EVM) y la BER. Este proceso se muestra en el esquema en bloques de la Figura 2.2.

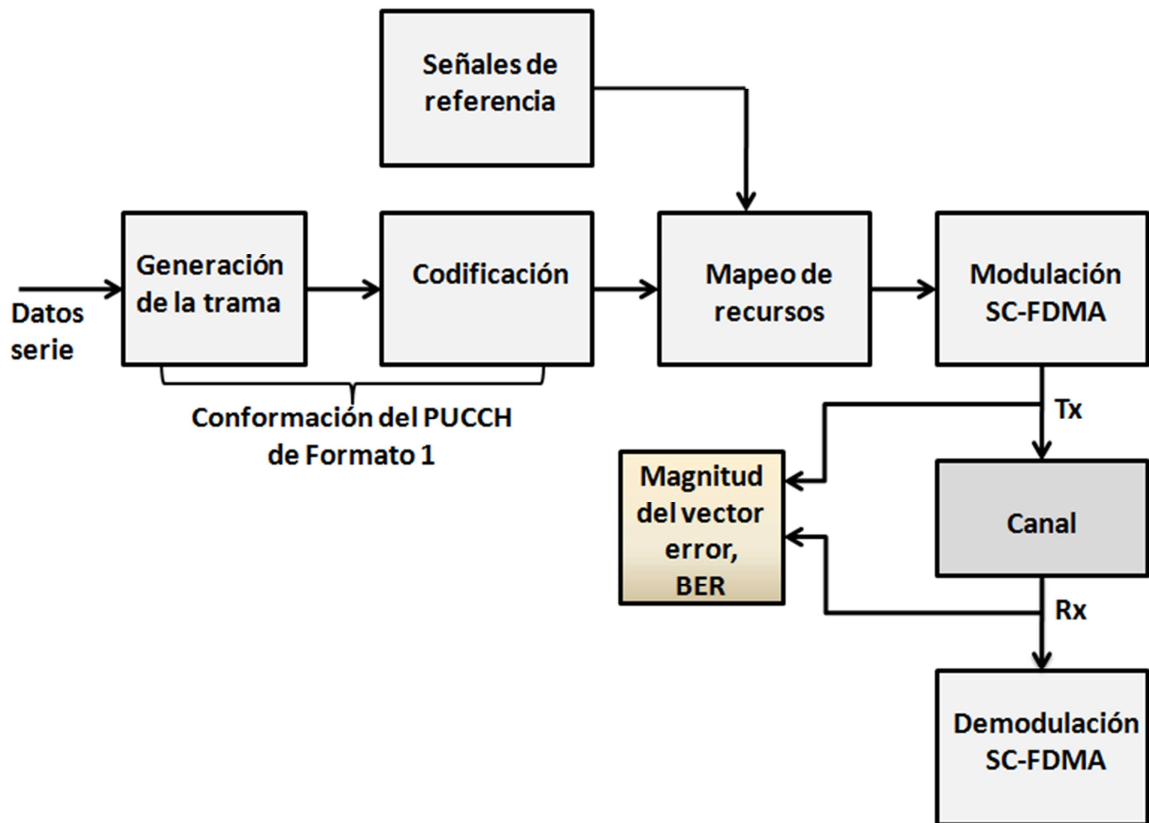


Figura 2.2 Diagrama en bloques del enlace ascendente

2.3.1 Funciones del LTE System Toolbox utilizadas en el enlace ascendente

Las funciones y estructuras del *LTE System Toolbox* que se utilizan en cada bloque de la simulación del enlace ascendente son las siguientes:

Generación de la trama

- Estructura `userup`

Se utiliza para configurar los parámetros del usuario entre estos están el número de bloques de recurso (PRB), cantidad de antenas transmisoras (que por ser un usuario es una sola), identificación o número de las celdas, número de subtramas, prefijo cíclico, la identificación del terminal móvil en la red (RNTI, *Radio Network Temporary Identifier*).

- Estructura `pucch1`

Se emplea para configurar el canal PUCCH formato 1, sus parámetros son el desplazamiento cíclico que da lugar a secuencias ortogonales entre sí, el índice y el tamaño de los recursos que determinan la posición inicial de la transmisión.

- Estructura `canal1`

Se utiliza para la configuración del canal de desvanecimiento, el ritmo de muestreo del canal se hace coincidir con el del usuario, se especifica el número de antenas receptoras (en este caso una), la frecuencia Doppler, se inicializa el tiempo en cero, el tipo de modelo de canal que en este caso es *Extended Typical Urban* (ETU), la fase inicial, el tipo de desvanecimiento experimentado que es el de Rayleigh, entre otros.

- `IteSCFDMAInfo (userup);`

Devuelve una estructura que contiene información de la modulación SCFDMA, los campos de esta son: la frecuencia de muestreo del usuario, el número de puntos FFT y el número de muestras que se visualizan en una ventana en el dominio del tiempo (*windowing*).

Codificación

- `ItePUCCH1 (userup, pucch1, hi1);`

Esta función devuelve una matriz compleja que contiene los símbolos del canal PUCCH formato 1 de acuerdo a la estructura `userup`, `hi1` es un vector HARQ, cada columna de la matriz representa los símbolos de cada antena.

Señal de referencia

- ltePUCCH1DRS (userup, pucch1);

Devuelve una matriz compleja que contiene la señal de referencia, cada columna de la matriz, representa los símbolos de cada antena.

Mapeo

- ltePUCCH1Indices (userup, pucch1);

Retorna una matriz cuyos elementos son los índices que fueron especificados para el usuario en la estructura userup y por la configuración del canal pucch1. También devuelve una estructura de información para el PUCCH formato 1, cada columna de la matriz representa los símbolos de cada antena.

- ltePUCCH1DRSIndices (userup, pucch1);

Retorna una matriz cuyos elementos son los índices que fueron especificados para el usuario en la estructura userup y por la configuración del canal pucch1. También devuelve una estructura de información que se usa para la demodulación de la señal de referencia (DRS), cada columna de la matriz representa los índices de cada antena.

- lteULResourceGrid (userup);

Retorna un arreglo de recursos que es generado de acuerdo a las especificaciones de la estructura userup, este arreglo está estructurado de la siguiente forma (NxMxP) y se emplea para representar los elementos de una subtrama. N representa el número de subportadoras, M el número de símbolos SCFDMA y P el número de antenas transmisoras.

Modulación SCFDMA

- [txwave1,info1] = lteSCFDMAModulate (userup, grid1);

Realiza la implementación de la IFFT, inserción del prefijo cíclico y todas las funciones del esquema de la Figura 1.3. Devuelve un matriz del tipo TxP, donde T es el número de muestras en el dominio del tiempo y P el número de antenas.

$$T = K \times \frac{30720}{2048 \times N_{IFFT}} \quad (2 - 1)$$

Dónde N_{IFFT} es la cantidad de muestras de la IFFT y K es el número de subportadoras en la entrada grid1.

También devuelve una estructura de información cuyos campos son: el número de muestras en el tiempo y el número de muestras de la FFT.

Canal

- lteFadingChannel (canal1,txwave1);

Esta función implementa un modelo de canal de desvanecimiento multitrayectoria MIMO que se configura a partir de la estructura canal1. El modelo del canal requiere el ritmo de muestreo de la señal en el tiempo por lo que se toma de info1, la señal generada contiene tantas columnas como antenas receptoras posea y esta característica la obtiene de txwave1.

- lteULFrameOffsetPUCCH1 (userup, pucch1, rxwave1);

Se emplea para realizar la sincronización usando un PUCCH formato1 a través de la señal de referencia (DRS). Devuelve el desplazamiento causado por el canal en la recepción de la señal obtenida, este valor indica cuantas muestras han sido demoradas. El desplazamiento se considera idéntico para las señales recibidas en todas las antenas.

Demodulación SCFDMA

- lteSCFDMADemodulate (userup, rxwave1(1+offset1:end, :));

Esta función se utiliza para realizar la demodulación de los símbolos SCFDMA, emplea la FFT para transformar del dominio del tiempo al de la frecuencia, elimina el prefijo cíclico y en sus argumentos se corrige el desplazamiento del canal.

2.3.2 Parámetros utilizados en el enlace ascendente

Para realizar el enlace ascendente se definieron parámetros teniendo en cuenta los aspectos teóricos comentados en el capítulo anterior, estos se recogen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros del enlace ascendente

| Parámetros | Valores |
|-------------------|---------|
| Número de PRBs | 6 |
| Número de antenas | 1 |

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Prefijo cíclico | Normal |
| Tipo de canal PUCCH | Formato 1 |
| Frecuencia Doppler | 300 Hz |
| SNR (dB) | 21 |
| Tamaño de la FFT | 128 |
| Número de subportadoras | 73 |
| Ancho de Banda | 1,4 MHz |
| Modelo de canal | <i>Extended Typical Urban (ETU)</i> |
| Tipo de desvanecimiento | Rayleigh |

2.4 Modelos de canal multitrayectoria empleado

Los modelos del canal definen las estadísticas de la propagación del canal, en LTE los canales de desvanecimiento multitrayectoria se definen por un perfil de demora multitrayectoria y una frecuencia Doppler máxima, esta puede ser 5, 70 o 300 Hz las que se corresponden con los perfiles de bajo, medio y alto respectivamente. En el anexo B de las especificaciones técnicas de la 3GPP [13], se describen las condiciones para la propagación en canales con desvanecimientos multitrayectorias, estos modelos son EPA (*Extended Pedestrian A model*), EVA (*Extended Vehicular A model*) que es el empleado en el enlace descendente y ETU (*Extended Typical Urban model*) que es el empleado en el enlace ascendente. Los detalles de estos modelos se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Perfiles de demora para los modelos de canales LTE (Fuente [13])

| Modelo | Número de trayectorias | Demora de propagación (ns) |
|--------|------------------------|--------------------------------|
| EPA | 7 | 45 |
| EVA | 9 | 357 |
| ETU | 9 | 991 |

Se escogió el modelo EVA para el enlace descendente porque para un mayor número de caminos es el que posee una menor demora y para el enlace ascendente se escogió el modelo ETU porque es el que introduce menos pérdidas de potencia, esto se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Modelos de canal LTE para escenarios típicos de propagación urbana. (Fuente [13])

| Número de caminos | EPA | | EVA | | ETU | |
|-------------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| | Demora | Potencia | Demora | Potencia | Demora | Potencia |
| | (ns) | (dB) | (ns) | (dB) | (ns) | (dB) |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 2 | 30 | -1 | 30 | -1,5 | 50 | -1 |
| 3 | 70 | -2 | 150 | -1,4 | 120 | -1 |
| 4 | 90 | -3 | 310 | -3,6 | 200 | 0 |
| 5 | 110 | -8 | 370 | -0,6 | 230 | 0 |
| 6 | 190 | -17,2 | 710 | -9,1 | 500 | 0 |
| 7 | 410 | -20,8 | 1090 | -7 | 1600 | -3 |
| 8 | | | 1730 | -12 | 2300 | -5 |
| 9 | | | 2510 | -16,9 | 5000 | -7 |

En las Figuras 2.3 y 2.4 se muestran los espectros clásicos para los modelos EVA con 70 Hz y ETU con 300 Hz de frecuencia Doppler.

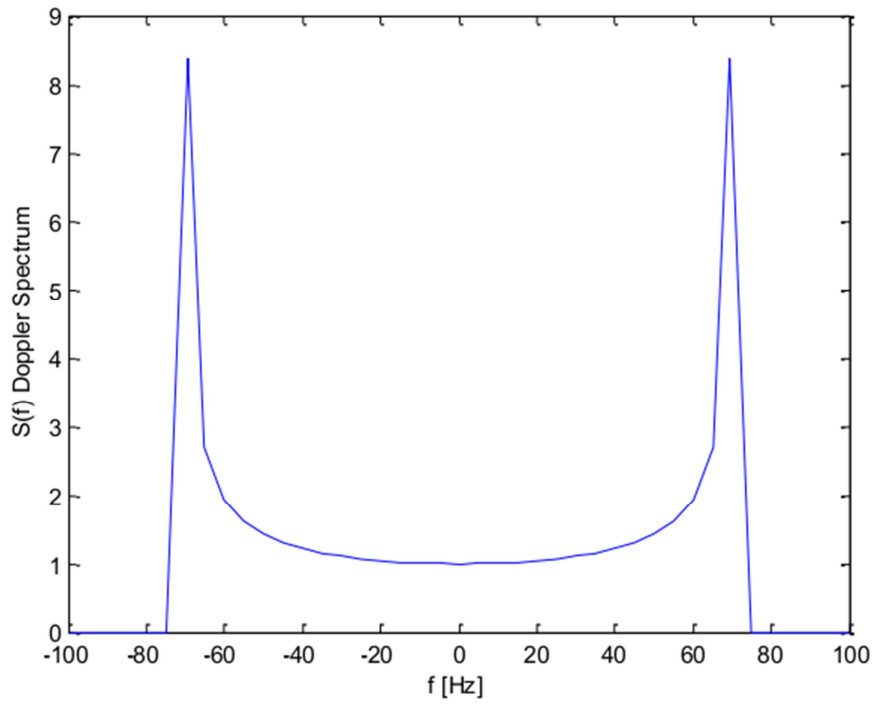


Figura 2.3 Espectro clásico del modelo EVA. (Fuente [14])

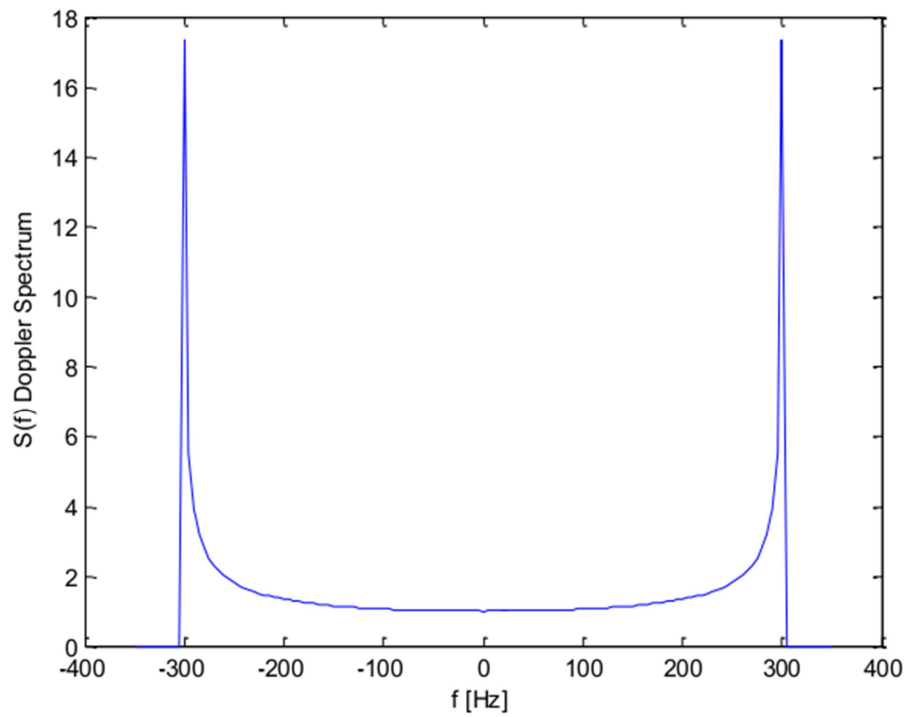


Figura 2.3 Espectro clásico del modelo ETU. (Fuente [14])

2.5 Capacidad del canal según el número de antenas empleadas

La técnica de diversidad en el espacio MIMO soporta múltiples antenas en recepción y transmisión como se muestra en la Figura 2.3. El objetivo de MIMO es lograr multiplexación y diversidad espacial.

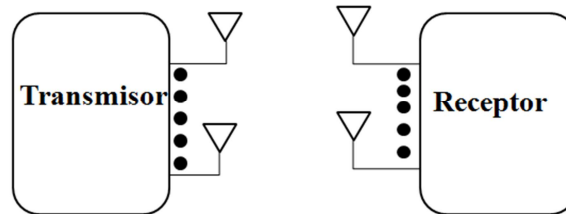


Figura 2.3 Técnica MIMO

La multiplexación espacial permite incrementar la capacidad transmitiendo diferentes flujos de datos simultáneos en paralelo, provenientes de distintas antenas. La diversidad espacial se emplea para incrementar la robustez de la comunicación en canales con desvanecimiento en frecuencia enviando múltiples réplicas de la señal transmitida desde diferentes antenas. De este modo MIMO se emplea para mejorar la capacidad [8].

Los cálculos que se realizan en este subepígrafe, son los correspondientes al enlace descendente.

2.5.1 Capacidad con el empleo de SISO

En [15], Claude Shannon demuestra que la eficiencia espectral libre de error para un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) del tipo SISO (*Simple Input Simple Output*) está dado por (2-2).

$$\frac{C}{B} = \log_2(1 + SNR) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (2-2)$$

Dónde C es la capacidad del canal (b/s), B es el ancho de banda (Hz) y SNR es la relación señal a ruido lineal.

La capacidad del sistema para un canal con AWGN se define por Shannon como:

$$C_{SISO} = B \log_2(1 + SNR) = 2,5 \text{ MHz} * 0,95 * \log_2(1 + 10) = 8,22 \text{ Mbps} \quad (2-3)$$

$$SNR = 10 \text{ es equivalente a } SNR(dB) = 10 \text{ dB}$$

Donde B es el ancho de banda ocupado por las subportadoras de datos y F el factor de corrección.

El ancho de banda está dado por:

$$B = \frac{N_{sc} * N_s * N_{prb}}{T_{sub}} = \frac{12 * 14 * 15}{10^{-3}} = 2,5 \text{ MHz} \quad (2 - 4)$$

Donde $N_{sc} = 12$, es el número de subportadoras en un PRB, N_s es el número de símbolos OFDM en una trama (frecuentemente 14 cuando se emplea el prefijo cíclico normal), N_{prb} es el número de PRBs correspondiente a la banda seleccionada, y T_{sub} es la duración de una subtrama que es 1 ms. El factor F representa las pérdidas inherentes del sistema debido a la transmisión necesaria del prefijo cíclico y los símbolos de referencia y se calcula de la siguiente forma:

$$F = \frac{T_{frame} - T_{CP}}{T_{frame}} * \frac{N_{sc} * \frac{N_s}{2} - N_{ref}}{N_{sc} * \frac{N_s}{2}} = \frac{10^{-2} - 65,8 * 10^{-6}}{10^{-2}} * \frac{12 * \frac{14}{2} - 4}{12 * \frac{14}{2}} = 0,95 \quad (2 - 5)$$

Donde T_{frame} es la duración de la trama que es igual a 10 ms y T_{CP} es el tiempo de todos los prefijos cíclicos dentro de una trama que, teniendo en cuenta que son 14 símbolos por trama y que se emplea el prefijo cíclico normal, este tiene una duración de 4,7μs entonces $T_{CP} = 14 * 4,7\mu s = 65,8 \mu s$. N_{ref} es el número de símbolos de referencia por PRB, este depende del número de antenas transmisoras, el factor de corrección decrece con el incremento del número de antenas transmisoras [16], en este caso se emplearon 4 símbolos por ser los correspondientes a una antena transmisora, como se puede apreciar en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Símbolos de referencia y factor de corrección en LTE (Tomada de [16])

| Antenas transmisoras N_t | Símbolos de referencia N_{ref} | Factor de corrección F (%) |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4 | 88.88 |
| 2 | 8 | 84.44 |
| 4 | 12 | 80 |

2.5.2 Capacidad con el empleo de MIMO

MIMO se emplea para incrementar la relación señal a ruido. En un sistema con N_t antenas transmisoras y N_r antenas receptoras, la relación señal a ruido recibida se incrementa en proporción de $N_t \times N_r$.

De (2-2), para valores pequeños de x , se puede emplear la aproximación $\log_2(1 + x) = x$, esto implica que para valores pequeños de relación señal a ruido la capacidad crece proporcional a esta. Para valores grandes de x se puede emplear la aproximación $\log_2(1 + x) = \log_2(x)$, lo que significa que para valores grandes de la relación señal a ruido, la capacidad crece de forma logarítmica con esta [8]. En este caso la capacidad del canal se muestra en la ecuación 2-6. Empleando 2 antenas, la capacidad quedaría:

$$C_{MIMO} = BN F \log_2(1 + SNR) = 8,22 \text{ Mbps} * 2 = 16,44 \text{ Mbps} \quad (2 - 6)$$

Dónde $N = N_t = N_r$

La ley clásica de Shannon se aplica a un sólo enlace de radio entre un transmisor y un receptor (SISO). Pero las técnicas MIMO crean múltiples enlaces de radio; cada enlace individual está limitado por la ley de Shannon, pero, en conjunto, pueden superarlo, como se aprecia en la ecuación (2-6) [17].

2.6 Control de potencia

El control de la potencia transmitida se emplea fundamentalmente en el enlace ascendente, es un factor muy importante cuando se despliega una red de comunicaciones

móviles con las características de LTE. No solo es importante por el consumo energético por parte del terminal, también lo es por la gestión de las interferencias intrínsecas al control de potencia. Con el principal objetivo de reducir las interferencias mientras se conserva la SNR, LTE introduce la fórmula del control de potencia.

El algoritmo de control de potencia posibilita la compensación parcial de las pérdidas de los usuarios, conocido como control de potencia fraccional o *FPC (Fractional Power Control)*. De este modo, los usuarios con pérdidas más altas transmitirán valores más bajos de potencia y así, generar menos interferencias a las celdas vecinas.

Básicamente, el control de potencia en el enlace ascendente es una combinación de un mecanismo de control en lazo abierto y en lazo cerrado. En lazo abierto, la potencia de transmisión del terminal se ajusta en función de una estimación de las pérdidas de propagación en el enlace descendente, de forma que se compensen dichas pérdidas para la transmisión en enlace ascendente. En lazo cerrado la red envía al terminal comandos específicos de control de potencia para ajustar y controlar la potencia de transmisión del terminal.

El control de potencia se establece según:

$$P = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10}N + \alpha L + \Delta_{MCS} + f(\Delta_i)\} [dBm] \quad (2 - 7)$$

La primera parte de la expresión $\min\{P_{max}, \dots\}$, establece que, en cualquier caso, la potencia transmitida es inferior a la potencia máxima disponible en el terminal.

Donde:

P_{max} : es la potencia máxima de transmisión del usuario.

P_0 : es un parámetro específico de la estación base y del usuario.

N : es el número de PRBs que se le asignan al usuario en la subtrama.

α : es un parámetro específico de la celda y corresponde a la compensación de las pérdidas de cada usuario.

L : son las pérdidas del usuario medidas en el enlace descendente a partir de la potencia recibida de la señal de referencia.

Δ_{MCS} : es un parámetro específico que depende del MCS (*Modulation and Coding Scheme*) escogido.

Δ_i : es una corrección de lazo cerrado específica de cada usuario.

Los parámetros más importantes a ajustar son los de lazo abierto, P_0 y α , ya que posibilitan el cumplimiento de la SNR requerida y del BLER que es un indicador que se calcula como la cantidad de paquetes que se han recibido incorrectamente en función del número total de paquetes enviados y que permite evaluar el funcionamiento del sistema. Por un lado P_0 regula la SNR de referencia en el receptor, un aumento en ésta variable provoca un incremento en la potencia total, generando más interferencia inter-celular. Sin embargo si P_0 se establece en un punto bajo, la potencia de transmisión puede ser demasiado baja para cumplir con las exigencias del BLER. Por otro lado, el parámetro de compensación de pérdidas fraccional, α , expone al sistema a un compromiso. Por un lado, si la variable es baja, la potencia de transmisión de un usuario en el límite de la celda se verá reducida, por tanto, las interferencias generadas serán inferiores, sin embargo, al mismo tiempo, al reducir su potencia de transmisión lo hará también su velocidad de transmisión, degradando así el límite de la celda. Si se reducen las interferencias en el límite de la celda, la transmisión de datos global crecerá, al precio de perder un correcto funcionamiento de los límites. De esto que el compromiso establecido sea entre la preservación del buen funcionamiento al límite de la celda, o bien la mayor transmisión de datos global [5].

2.7 Unidad de control de errores (HARQ)

Tal y como se explica en las especificaciones del 3GPP [13], la manera más usual de gestionar los errores de la transmisión es mediante el ARQ (*Automatic Repeat Request*). En el ARQ, el receptor utiliza un código de detección de error para detectar si el paquete recibido contiene errores o no. Si no contiene errores, el receptor envía un reconocimiento positivo, ACK (*acknowledgement*). Del mismo modo, si se detecta un error se envía desde el receptor un mensaje de reconocimiento negativo, NACK. En respuesta al último mensaje el transmisor tiene que enviar otra vez la misma información.

En LTE, sin embargo, se utiliza un modo híbrido entre FEC (*Forward Error-Correcting Coding*) y ARQ, conocido como HARQ (*Hybrid ARQ*). Los paquetes erróneos son descartados y se reclama la retransmisión de estos mismos paquetes. En el caso de LTE en el enlace ascendente el HARQ se dice ser síncrono y adaptativo, con lo que la retransmisión puede tener lugar en cualquier punto del ancho de banda del sistema, pero en una subtrama específica.

En las operaciones de capa física del HARQ el receptor conserva los paquetes calificados como erróneos para una posterior combinación con el nuevo paquete de datos, una vez

que la retransmisión es recibida. Al aumentar la información que se dispone en el receptor gracias a las retransmisiones, la SNR necesaria para cumplir con el BLER disminuye.

El intervalo de tiempo que transcurre desde la detección del error a la retransmisión de un paquete es de 8 ms , este tiempo es el retardo de transmisión y es equivalente al tiempo que tardará un usuario en realizar la solicitud de entrada al eNB y ser aceptado o denegado en el sistema [8].

En este capítulo se realizó la implementación de los enlaces descendente y ascendente de LTE utilizando el *software* Matlab, se especificaron todas las funciones empleadas, los parámetros utilizados, los diagramas en bloques y algunos otros aspectos de interés. En el siguiente capítulo se procederá al análisis de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones.

CAPITULO 3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENLACES LTE

La implementación de laboratorios con equipamiento costoso y tecnológicamente avanzado para realizar experimentos y evaluar el desempeño de sistemas LTE o cualquier otro sistema de comunicaciones complejo, es una solución que desde el punto de vista económico y técnico suele ser muy costosa y en algunos casos una alternativa poco viable como primer paso en la investigación de determinados sistemas. La simulación es una potente herramienta que posibilita imitar un sistema complejo bajo determinadas condiciones, analizando las características esenciales de un proceso que ocurre en la realidad a partir de un modelo creado y almacenado en la memoria de una computadora. Su uso para evaluar el funcionamiento de sistemas LTE es de extrema importancia, pues constituye una técnica de relativamente fácil manejo que se traduce en ahorro de recursos y es por ello que comúnmente se convierte en el primer paso a la hora de implementar físicamente un sistema de comunicaciones, sustituyendo en ocasiones la experimentación clásica para el análisis de los resultados [5]. En este capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de la simulación de los enlaces descendente y ascendente de LTE.

3.1 Análisis de los resultados del enlace descendente

Para el enlace descendente se crea una trama de datos que pasa a través de un canal de desvanecimiento y luego es recibida. En las Figuras 3.1 y 3.2 se ilustran las tramas transmitidas y recibidas, dejando evidenciado las facilidades que brindan las funciones del *LTE System Toolbox* [6].

Se genera una trama válida según las especificaciones del LTE con sus símbolos modulados con QPSK, 16QAM o 64QAM. Se genera además la señal de referencia y las señales de sincronización primaria y secundaria, estas se mapean en 10 subtramas individuales y conforman la trama.

La trama se modula en OFDM y pasa a través de un canal de desvanecimiento al que se le añade ruido blanco gaussiano. Luego esta señal se demodula en el receptor OFDM. En la Figura 3.1 se muestra la señal OFDM transmitida, esta posee una relación señal a ruido de 10 dB y 15 bloques de recursos físicos por lo que se corresponde con una señal de 3 MHz de ancho de banda.

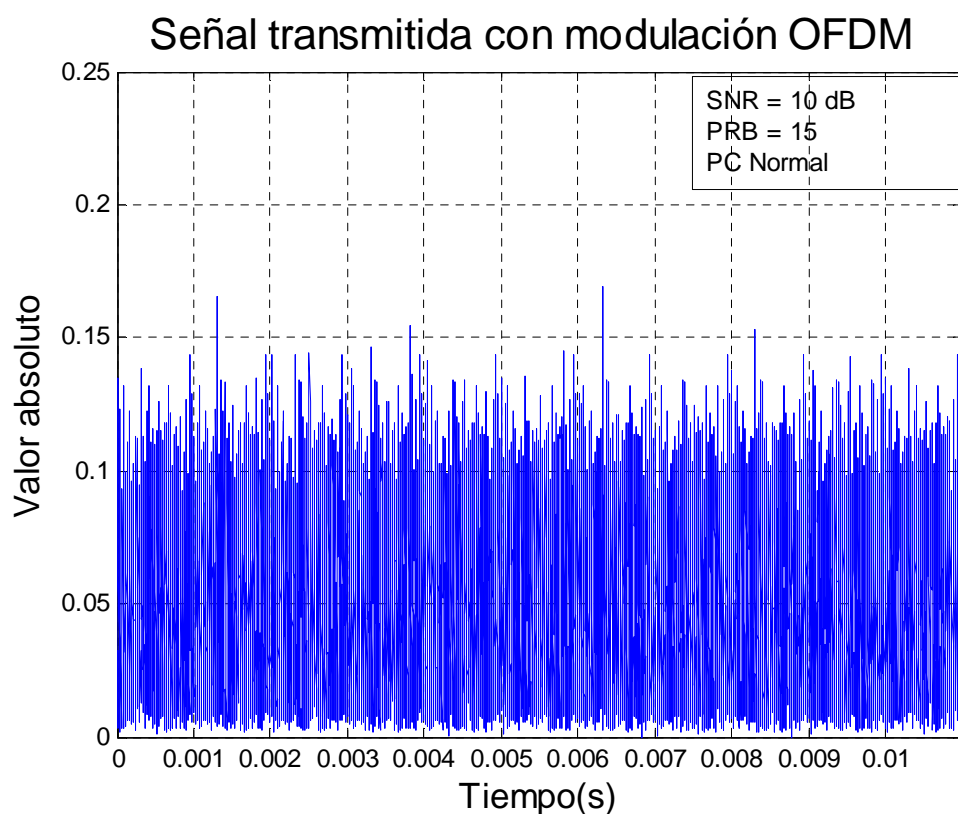


Figura 3.1 Señal transmitida con modulación OFDM

En la Figura 3.2 se muestra la señal recibida, se aprecia la degradación que experimenta debido a los desvanecimientos en frecuencia y la adición de ruido blanco gaussiano en el canal.

Señal luego de pasar el canal con ruido blanco gaussiano

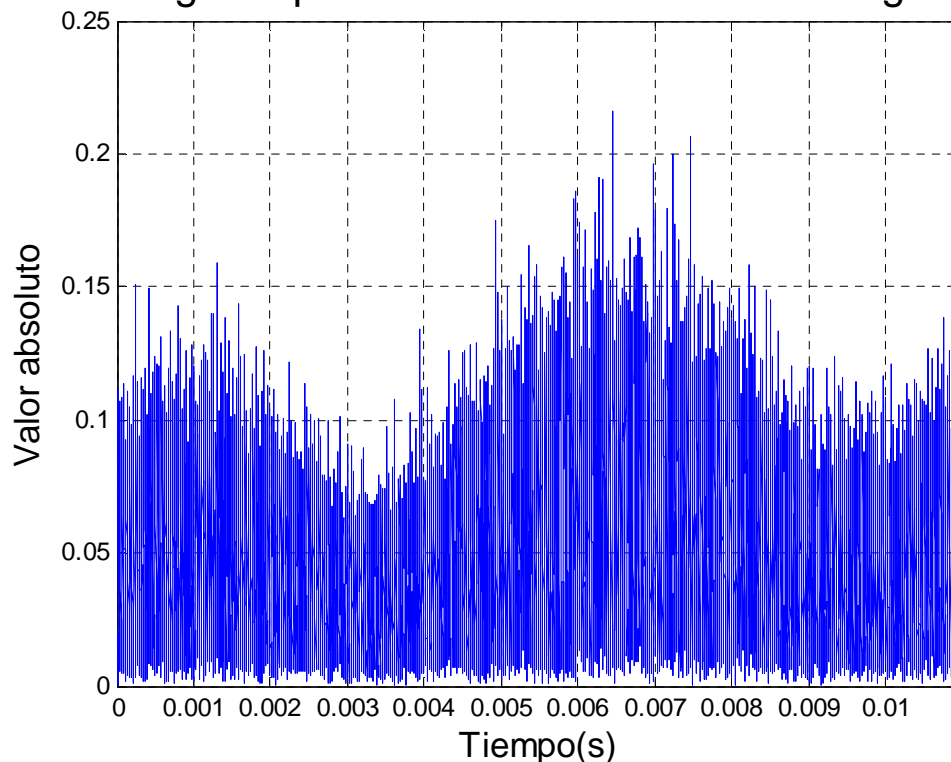


Figura 3.2 Señal OFDM luego de pasar el canal con ruido blanco gaussiano

3.1.1 Estimación de la densidad espectral de potencia por el método de Welch

Para la estimación de la densidad espectral de potencia se empleó la función “*pwelch*” presente en las herramientas de procesamiento de señal (*Signal Processing Toolbox*) contenidas en el Matlab, esta función calcula la densidad espectral de potencia a partir del método de Welch.

Este método está basado en la Transformada de Fourier, en el se divide el registro de N puntos originales (señal original) en segmentos de M puntos, solapados entre sí L muestras. Posteriormente se aplica una ventana a cada segmento, y finalmente se calcula el periodograma para cada uno de ellos. El periodograma final se obtiene promediando todos los periodogramas parciales, esto contribuye a que su varianza tienda a cero cuando la longitud del registro tienda a infinito [18], [19].

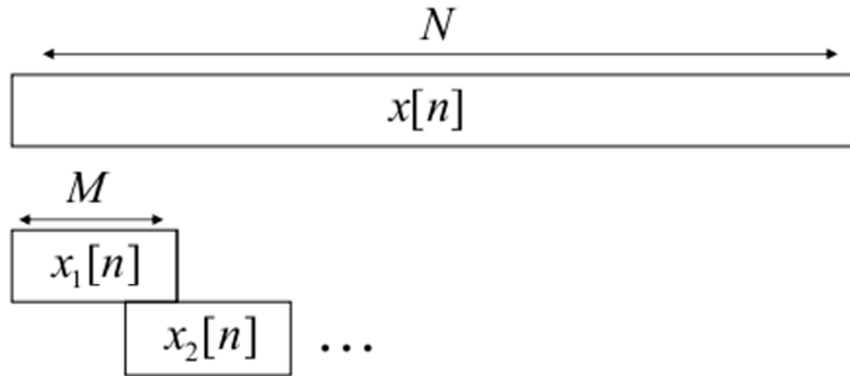


Figura 3.3 Método de Welch

Si se permite un solapamiento del 50%, como es el propuesto por Welch, el número de segmentos K de longitud M es:

$$K = \frac{2 \cdot N}{M - 1} \quad (3 - 1)$$

Si se emplean segmentos más cortos, K aumenta y la varianza se reduce.

3.1.2 Periodograma

La DFT de una función muestreada viene dada por (3-2):

$$X(\omega) = T \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi\omega n / N} \quad (3 - 2)$$

Donde T es el período de muestreo. Su densidad espectral de energía (ESD) vendrá dada por (3-3):

$$S(\omega) = |X_\omega|^2 \quad (3 - 3)$$

y suele denominarse también periodograma, siendo un estimador espectral de la señal.

Si el proceso $x(n)$ es un proceso estocástico en lugar de uno determinístico, lo que implica que no se trata de una onda con energía finita, sino infinita, el parámetro de interés no es la energía sino la potencia. Para este caso, se define el periodograma como densidad espectral de potencia (PSD) según (3-3):

$$P(\omega) = \frac{|X_\omega|^2}{N \cdot T} \quad (3 - 4)$$

$P(\omega)$ es idéntico a la densidad espectral de energía $S(\omega)$ excepto por la división del intervalo de tiempo $N \cdot T$ segundos, lo que lo convierte en una densidad espectral de potencia [19].

Entonces la densidad espectral de potencia viene dada por (3-5):

$$S_p = \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^K P_j(\omega) \quad (3 - 5)$$

En la Figura 3.3 se puede observar el espectro de potencia de la señal OFDM a partir de esta función, en la cual se ilustra un espectro plano en el que no se visualiza el conjunto de frecuencias correspondientes a la banda de guarda introducida, tal y como corresponde al espectro de potencia esperado de una señal OFDM. La información a transmitir modulada las subportadoras ortogonales de menor ancho de banda. La densidad espectral de potencia de la señal a transmitir es la composición de las densidades de potencia de las distintas subportadoras que conforman la señal.

El ancho de banda de la señal OFDM en banda base es de 3MHz, esto se debe a que se emplean 15 PRBs para un total de 181 subportadoras espaciadas uniformemente entre si 15 kHz, siguiendo las especificaciones de LTE [2], [13].

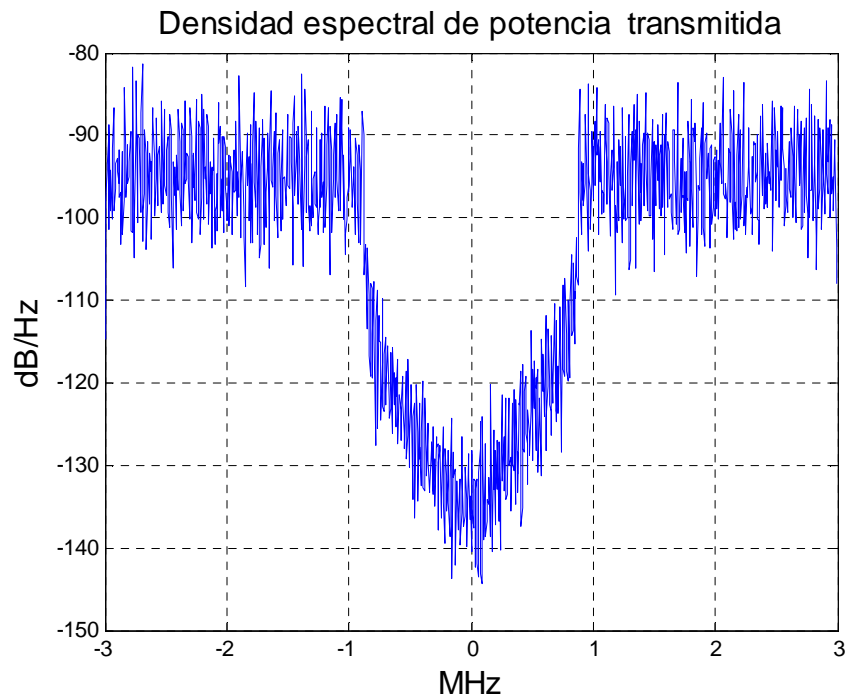


Figura 3.3 Densidad espectral de potencia transmitida

En la Figura 3.4 se observa el espectro de potencia de la señal OFDM luego de pasar el canal, se aprecian los efectos del mismo sobre el espectro, al alterar su forma inicial en las distintas frecuencias.

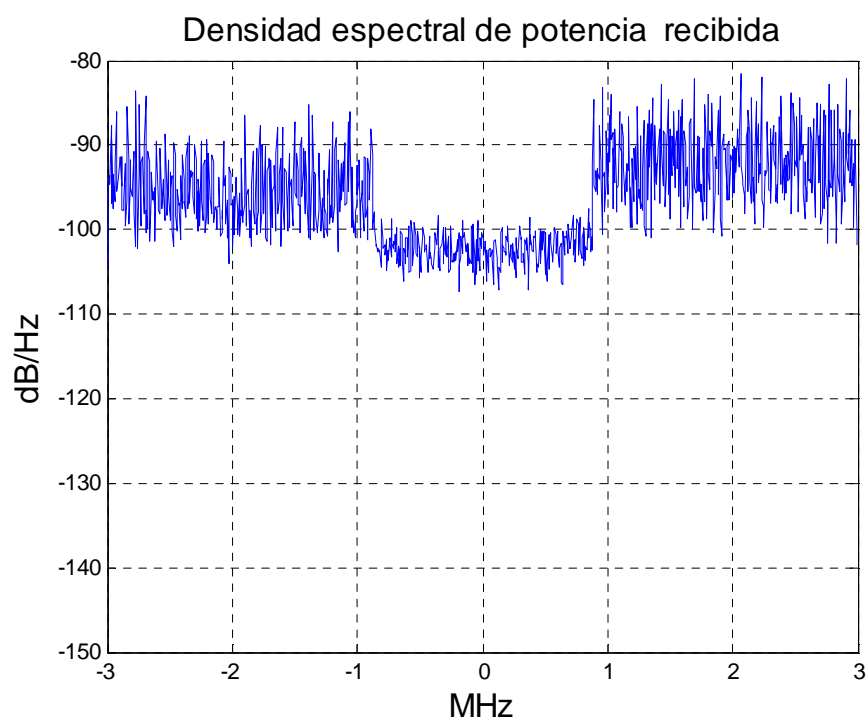


Figura 3.4 Densidad espectral de potencia recibida

3.1.3 Análisis de la magnitud del vector error

El EVM (*Error Vector Magnitude*) representa la diferencia vectorial entre la posición ideal del símbolo en la constelación frente al valor detectado en condiciones no ideales de interferencia, cuantificado como el módulo del vector diferencia entre ambos [7], lo anterior se representa en la Figura 3.5.

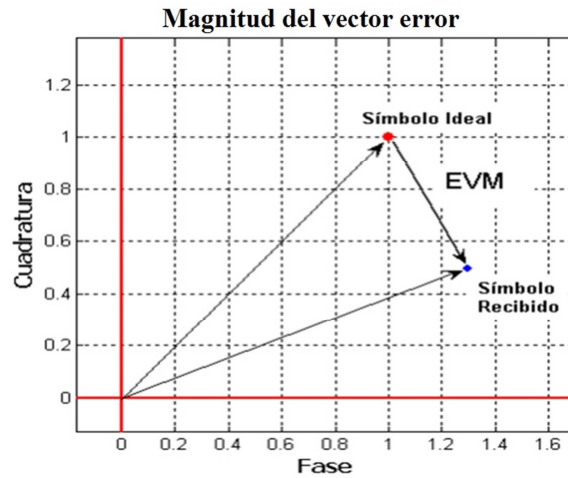


Figura 3.5 Representación del EVM

En la Figura 3.6 se muestran los valores modulares del EVM para los primeros 40 símbolos recibidos empleando la modulación QPSK, se pueden observar tres curvas para los valores de SNR de 5, 10 y 30 dB. Los valores de EVM observados están en el rango permitido para esta modulación en comparación a los obtenidos en [7] y mostrados en la Figura A1.1 el ANEXO I, la curva de SNR = 5 dB es la que introduce un mayor error por ser la señal de menor calidad. Las curvas a partir de SNR =10 dB tienen un comportamiento similar, lo que se aprecia al comparar con la de SNR = 30 dB. De esta forma se afirma que con una SNR de 10 dB el sistema posee un buen desempeño ante los limitantes del canal de radio.

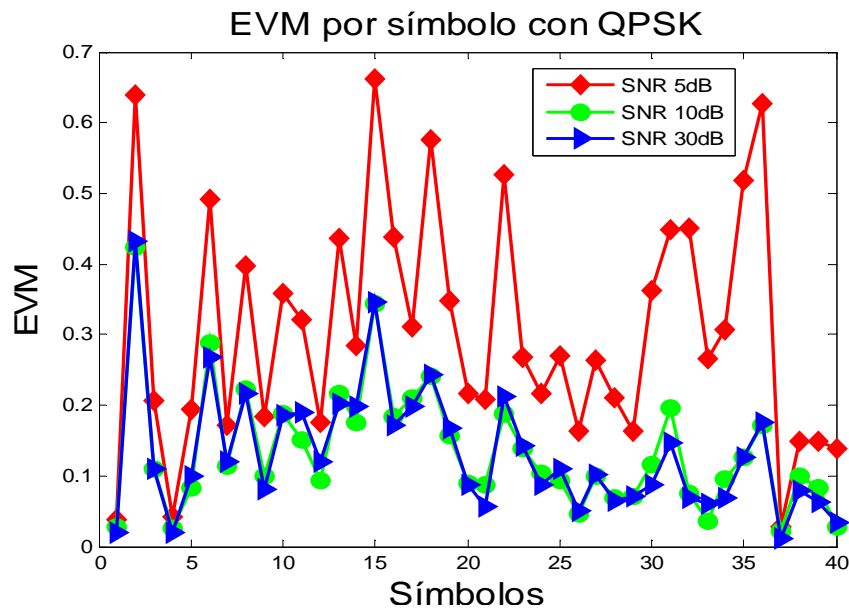


Figura 3.6 EVM por símbolo para la modulación QPSK

En la Figura 3.7 se muestran los valores modulares del EVM para los primeros 40 símbolos recibidos, pero en este caso manteniendo una SNR constante a 10 dB y variando la modulación de los símbolos en QPSK, 16QAM y 64QAM. Las modulaciones de más alto nivel proporcionan mayor número de bits eficaces por símbolo y por lo tanto mayor tasa binaria, sin embargo, estas modulaciones presentan constelaciones más complejas y son más sensibles a interferencias, por lo que necesitarán mayores requisitos de potencia para mantener el mismo EVM [7]. Se puede observar en la Figura 3.7 que los valores alcanzados con 64QAM y 16QAM son similares entre si, pero estos son mayores a los alcanzados con QPSK. Las curvas correspondientes a 16QAM y 64QAM poseen valores muy inferiores en comparación a los obtenidos en [7] y mostrados en las Figuras A1.2 y A1.3 del ANEXO I.

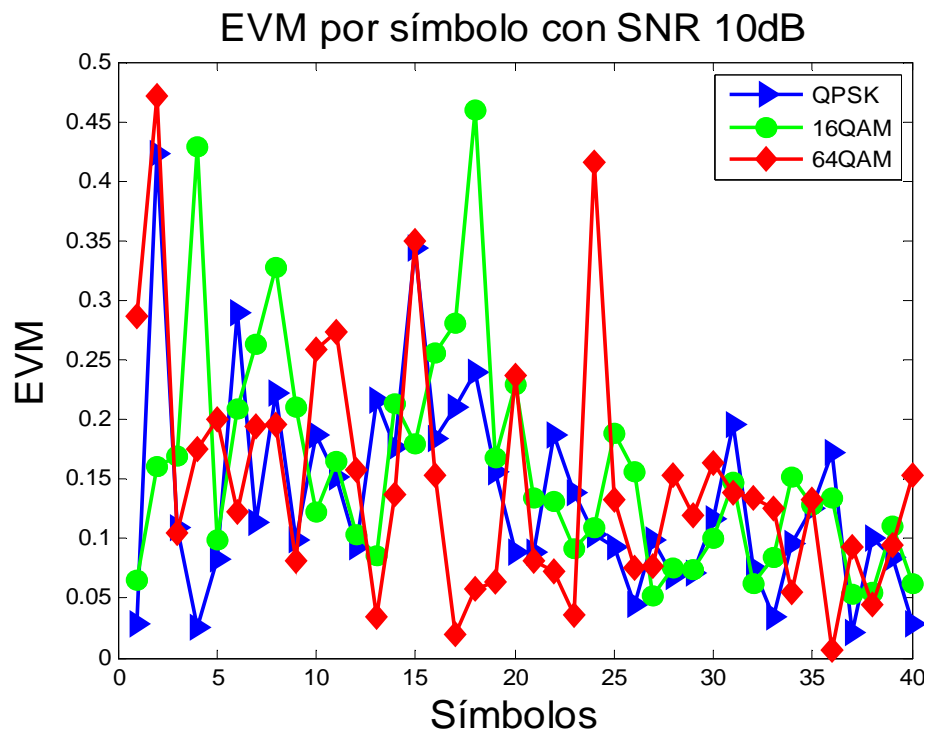


Figura 3.7 EVM por símbolo para SNR =10dB

Para modulaciones de orden superior, el valor del EVM es mayor. Del mismo modo, al aumentar las interferencias, es decir, para SNR más bajas, el EVM también aumenta, lo que supone una utilización menos eficiente de la modulación, y en consecuencia una disminución de la tasa de bits efectiva del sistema. De esta forma, dependiendo de las

condiciones generales del medio, será más recomendable utilizar un tipo de modulación que otra.

En la Tabla 3.1 se presentan los datos obtenidos de los valores de EVM, se observa que el valor más alto es el de la modulación 64QAM con menor SNR y el más bajo es el de la modulación QPSK con mayor SNR, lo que permiten corroborar la influencia de la SNR y de los métodos de modulación.

Tabla 3.1 Valores promedio de EVM para distintas SNR

| Modulación | SNR(dB) | | | | | |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| QPSK | 0.1900 | 0.1835 | 0.1826 | 0.1823 | 0.1823 | 0.1823 |
| 16QAM | 0.1995 | 0.1976 | 0.1971 | 0.1971 | 0.1972 | 0.1973 |
| 64QAM | 0.2101 | 0.2062 | 0.2049 | 0.2046 | 0.2045 | 0.2045 |

En la Figura 3.8 se permite apreciar más claramente estas influencias, se observa como los valores de la curva correspondiente a la modulación de orden superior (64QAM) son mayores que los de las modulaciones con un menor orden (16QAM y QPSK) y a la vez se ve que con el aumento de la SNR tienden a disminuir los valores de EVM.

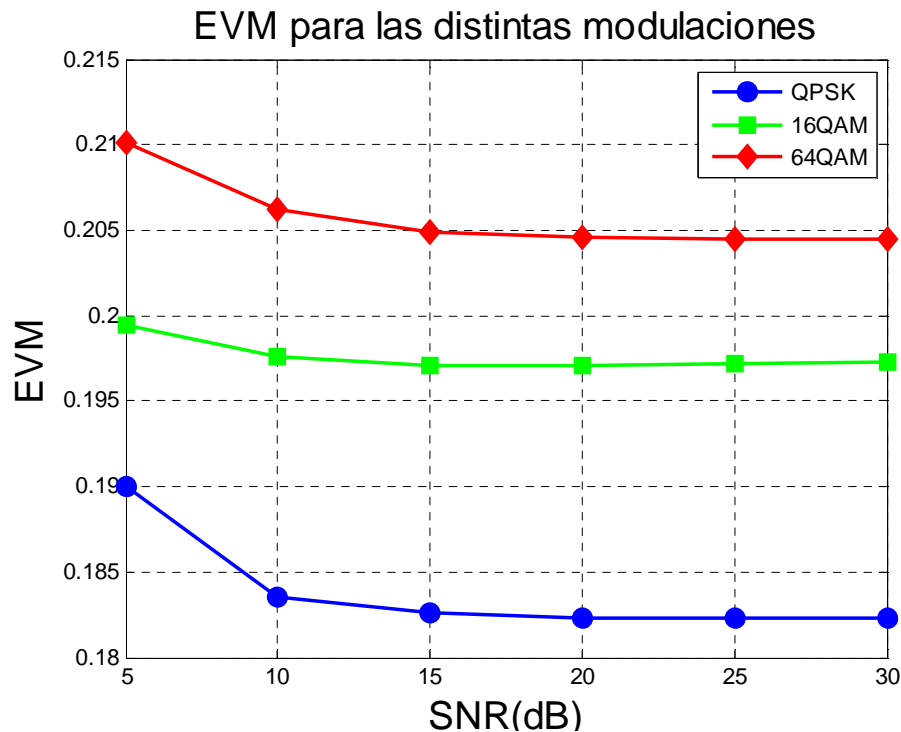


Figura 3.8 Curvas de EVM para las modulaciones empleadas

3.1.4 Fidelidad del enlace. Análisis de la BER

La razón de bits erróneos (BER) o proporción de errores es la encargada de cuantificar el número de bits erróneos recibidos respecto al número total de bits transmitidos, cuando el total de bits transmitidos es lo suficientemente grande para que haya regularidad estadística en su determinación o para que permita el empleo de métodos de inferencia como el de Monte Carlo. Esta relación se describe en la ecuación (3-6).

$$BER = \frac{\text{número de bits erróneos}}{\text{total de bits transmitidos}} \quad (3 - 6)$$

En la Figura 3.9 se muestran los valores obtenidos para la *BER* a partir de las funciones “*semilogy*” y “*semianalytic*” del software empleado, para las distintas modulaciones de bits empleadas en el enlace descendente y distintos valores de SNR. Estas curvas son el resultado del empleo de una configuración SISO para el enlace. Se puede apreciar como los bits erróneos debido a las características del canal, disminuyen con el aumento de la SNR por lo que significa una mejora de la BER. A partir de valores de $SNR = 10 \text{ dB}$ todas las curvas presentan una $BER \leq 10^{-1}$, por lo que el enlace presenta un buen comportamiento frente a las limitantes del canal de radio [20]. La curva correspondiente a la modulación 64QAM es la que posee un mayor valor de la BER por generar un mayor número de bits transmitidos. Las curvas obtenidas se corresponden con las características de LTE, esto se puede comprobar comparándolas con las curvas SISO obtenidas en [22] y que se muestran en las Figuras A2.1 y A2.2 del ANEXO II.

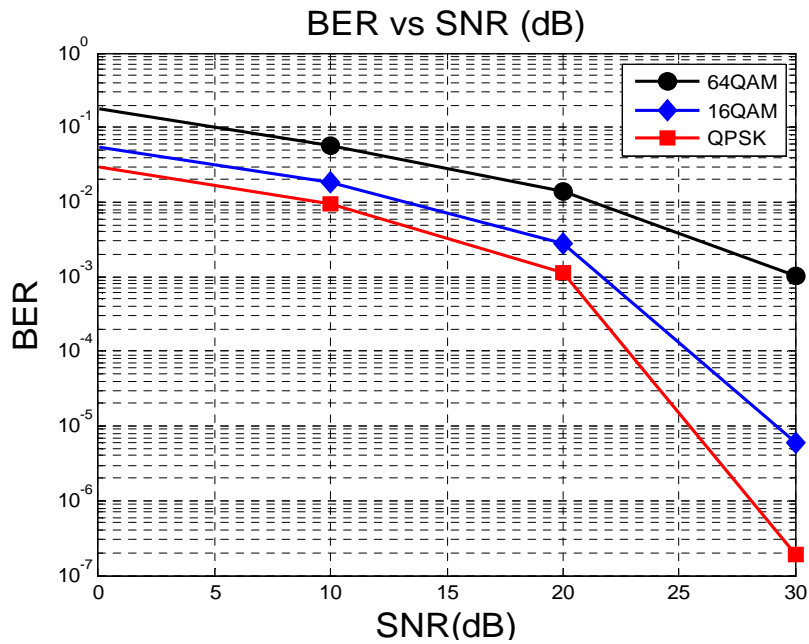


Figura 3.9 BER vs SNR enlace descendente

3.2 Análisis de los resultados del enlace ascendente

Para el enlace ascendente se crea igualmente una trama de datos que pasa a través de un canal de desvanecimiento y luego se recibe. En las Figuras 3.10 y 3.11 se ilustran las tramas, transmitida y recibida, respectivamente.

Se emplea SC-FDMA para la modulación de la trama y pasa a través de un canal de desvanecimiento al que se le añade ruido blanco gaussiano. Luego esta señal se demodula en el receptor. En la Figura 3.10 se muestra la señal que se transmite, se puede observar que la señal, por ser de portadora única, tiene menor tasa de bits que la señal equivalente en el enlace descendente, esta señal posee una relación señal a ruido de 20 dB y 6 bloques de recursos físicos por lo que se corresponde con una señal de 1,4 MHz de ancho de banda según las especificaciones de LTE [2], [13].

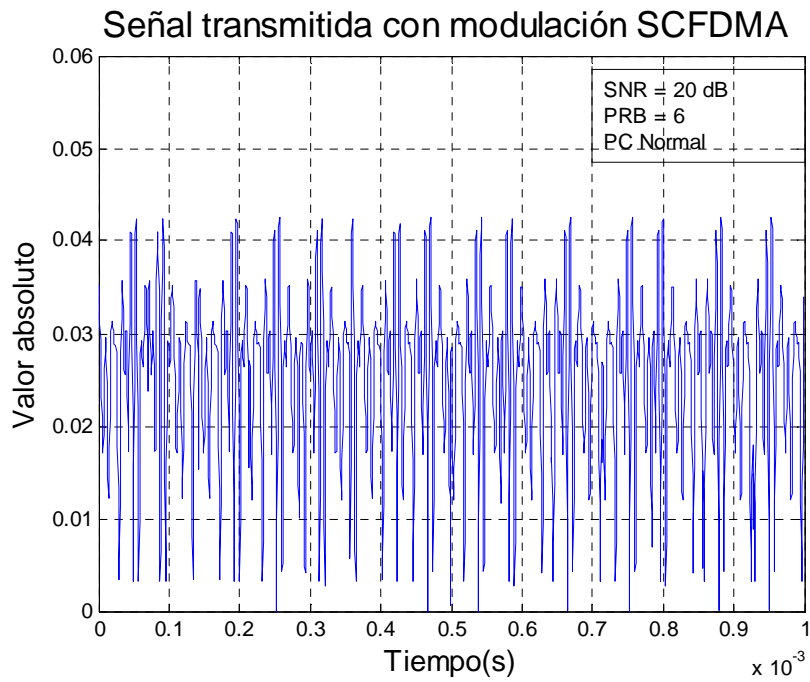


Figura 3.10 Señal modulada con SCFDMA y transmitida

En la Figura 3.11 se muestra la señal recibida, se aprecia la degradación que experimenta debido a los desvanecimientos en frecuencia y la adición de ruido blanco gaussiano.

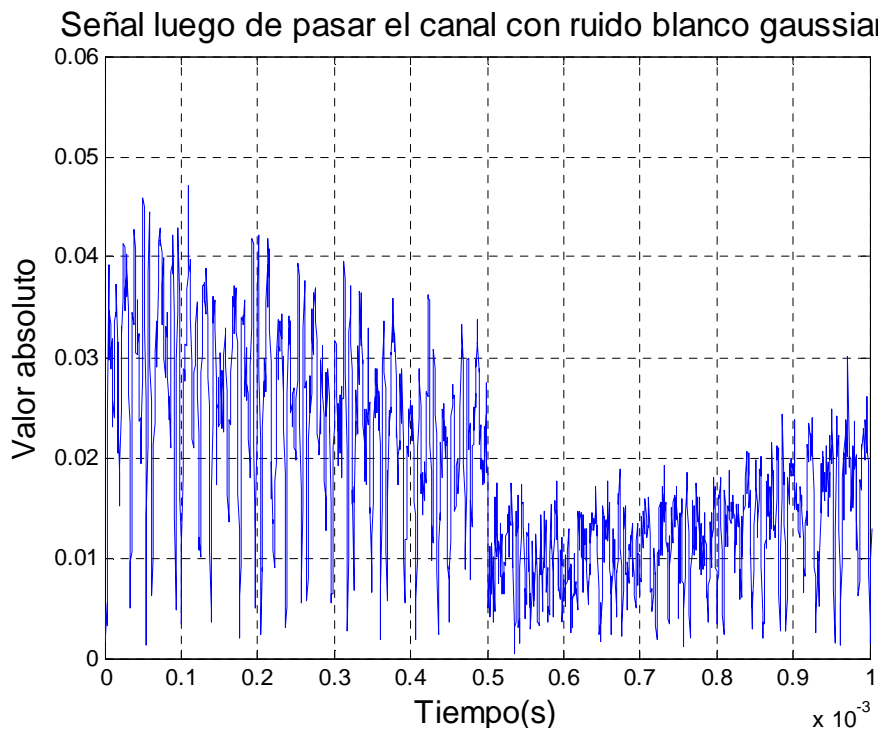


Figura 3.11 Señal SCFDMA luego de pasar el canal con ruido blanco gaussiano

3.2.1 Estimación de la densidad espectral de potencia por el método de Welch

En la Figura 3.12 se observa el espectro de potencia de la señal SC-FDMA a partir de la función “*pwelch*”, en la cual se visualiza un espectro de potencia de un usuario que accede al canal para realizar la comunicación con la estación base. El ancho de banda de la señal SC-FDMA en banda base es de 1,4 MHz, esto se debe a que se emplean 6 PRBs para un total de 73 subportadoras espaciadas uniformemente entre si 15 kHz siguiendo las especificaciones de LTE [2], [13].

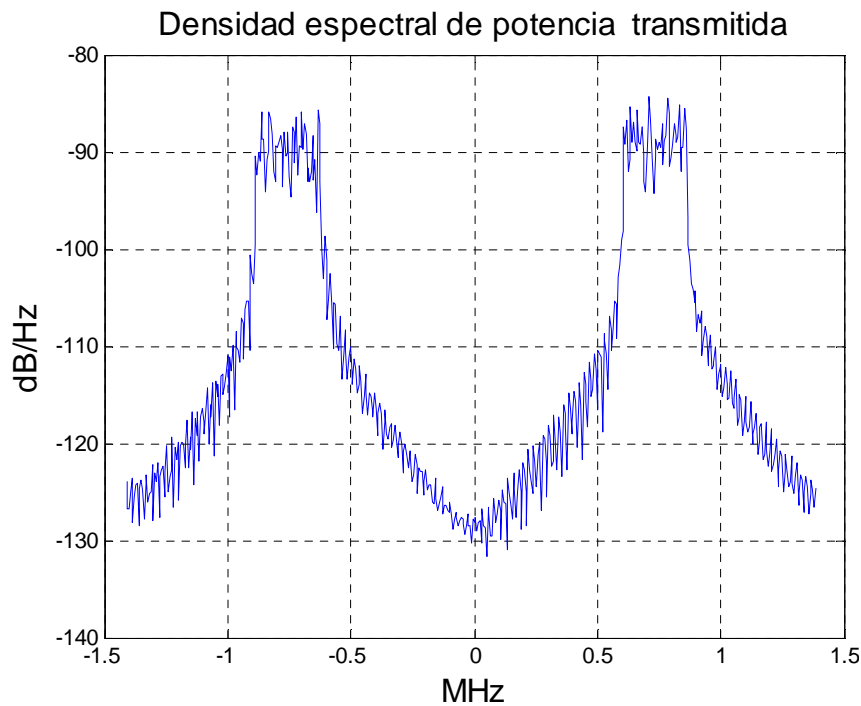


Figura 3.12 Densidad espectral de potencia transmitida

En la Figura 3.13 se observa el espectro de potencia de la señal SC-FDMA luego de pasar el canal, se aprecian los efectos del mismo sobre el espectro del usuario al variarlo en las distintas frecuencias.

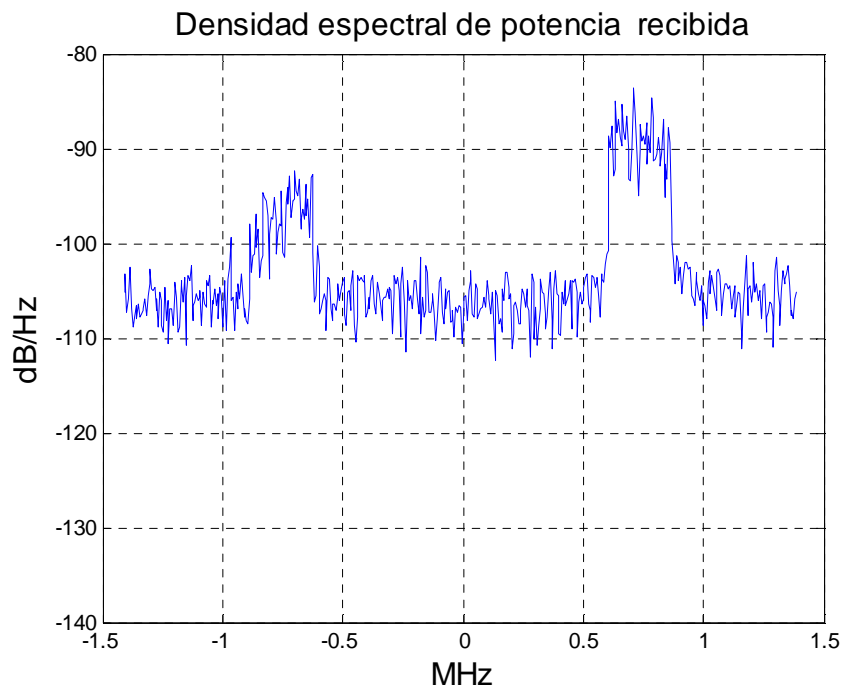


Figura 3.13 Densidad espectral de potencia recibida

3.2.2 Análisis de la magnitud del vector error

En la Figura 3.14 se muestran los valores modulares del EVM para los primeros 40 símbolos, se pueden observar seis curvas para los valores de SNR de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 dB. Los valores de EVM observados son pequeños aunque los valores pico son mayores en comparación a los del enlace descendente debido a que se trata de una estación móvil, que transmite a una potencia muy inferior a la que puede transmitir una estación base. La curva de SNR = 5 dB es la que introduce un mayor error por ser la señal de menor calidad. A medida que aumenta la SNR los valores de EVM disminuyen. En este enlace se grafica un mayor número de curvas porque es más notable el cambio entre ellas al variar la SNR.

El comportamiento que tiene las curvas hasta aproximadamente el símbolo 13 de poseer los mayores valores de EVM se debe a que este sistema posee una fase de entrenamiento que es fundamentalmente para que se logre la sincronización y debido a la característica del canal ascendente de estar en uso constantemente, el terminal móvil debe esperar a que el canal esté en desuso para acceder a él y para esto debe escucharlo y luego sincronizarse.

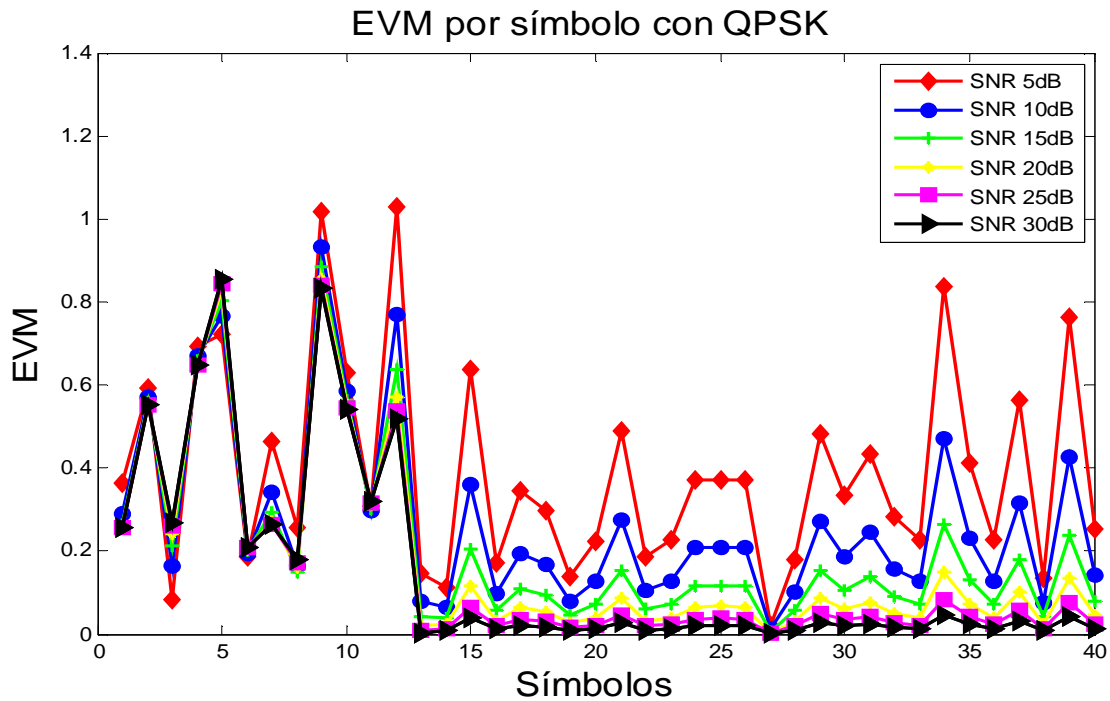


Figura 3.14 EVM por símbolo del enlace ascendente

3.2.3 Fidelidad del enlace. Análisis de la BER

En la Figura 3.15 se muestran los valores obtenidos para la BER a partir de las funciones “semilogy” y “semianalytic” del software empleado, para las distintas modulaciones de bits empleadas en el enlace ascendente y distintos valores de SNR. Estas curvas son el resultado del empleo de una configuración SISO para el enlace. Se puede apreciar como los bits erróneos debido a las características del canal, disminuyen con el aumento de la SNR por lo que significa una mejora del BER, a partir de $SNR = 10 \text{ dB}$ todas las curvas presentan una $BER \leq 10^{-1}$ por lo que el enlace presenta un buen comportamiento frente a las limitantes del canal de radio [20]. En este enlace los valores obtenidos están ligeramente por encima de los valores del enlace descendente debido a que la potencia transmitida es inferior, hasta llegar a una $SNR = 40 \text{ dB}$, a partir de ahí las curvas caen abruptamente mejorando considerablemente la BER, exceptuando de este comportamiento a la curva de correspondiente a la modulación de 64QAM, que como era de esperarse, es la que posee un mayor valor de la BER. Las curvas obtenidas se corresponden con las características de LTE, esto se puede comprobar con las curvas SISO obtenidas en [21] que se muestran en las Figuras A2.1 y A2.2 del ANEXO II.

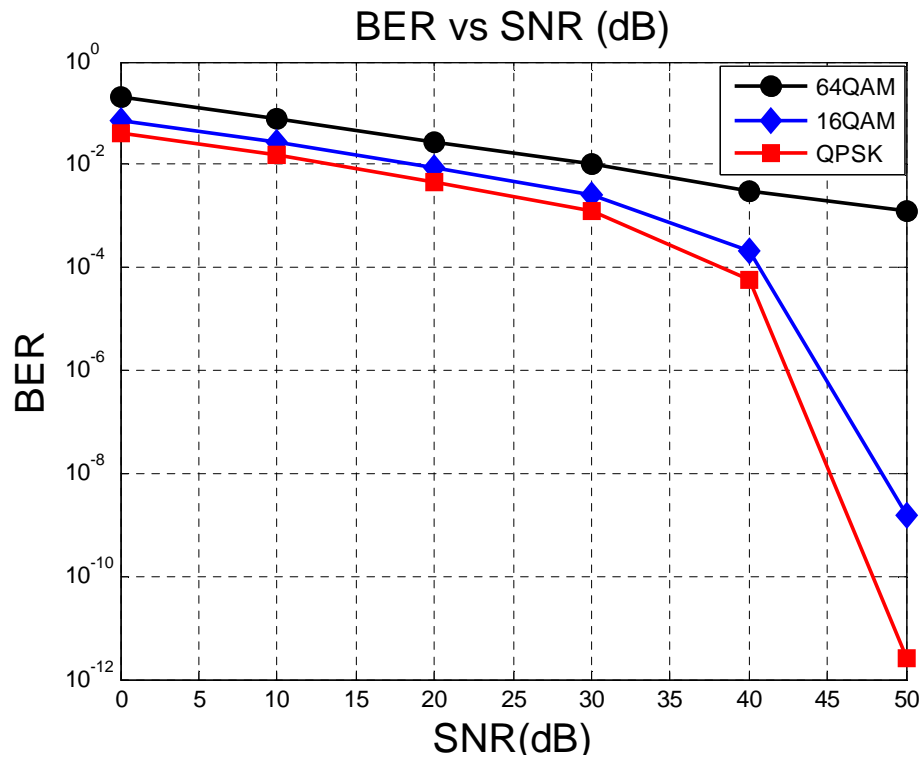


Figura 3.15 BER vs SNR enlace ascendente

3.3 Comparación de la proporción de errores entre los enlaces

En la Figura 3.16 se visualiza una comparación entre los enlaces teniendo en cuenta la proporción de errores, para esta se empleó la modulación 64QAM por ser la que mayor número de bits erróneos puede causar, como se observa el enlace ascendente que es el que emplea SCFDMA posee un valor ligeramente mayor de la BER que el enlace descendente que emplea OFDMA. A pesar de que se transmite un menor número de bits en el enlace ascendente por ser de modulación de portadora simple, al transmitirse con una menor potencia, es más vulnerable al surgimiento de errores, sin embargo sus valores de la BER se acercan bastante a los del enlace descendente.

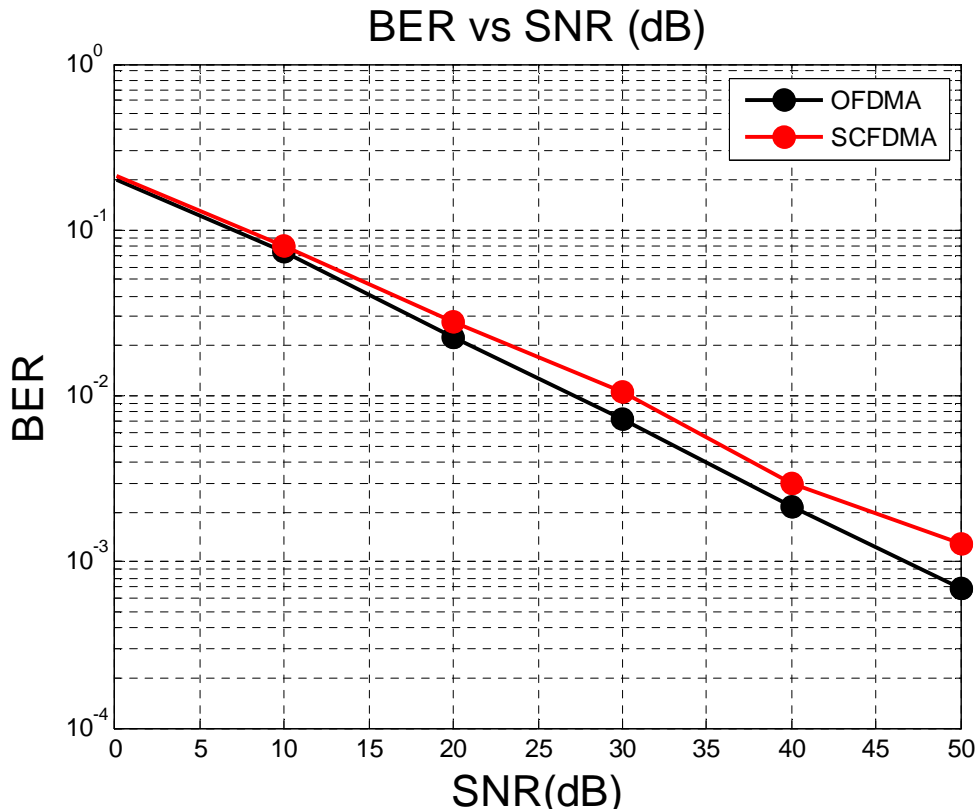


Figura 3.16 Comparación BER vs SNR entre los enlaces

3.4 Resultado de la capacidad del 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 aumenta el número de antenas en recepción y el número de antenas en transmisión. Como se puede apreciar en la Figura 3.17 la curva correspondiente al sistema SISO es la que posee menores valores de capacidad por contar con el menor número de antenas, por el contrario en el sistema MIMO 8x8 se obtienen mayores valores de capacidad, estos están asociados a un ancho de banda de 2,5 MHz que es el empleado en el enlace descendente. También se permite observar cómo la capacidad del canal aumenta con el incremento de la SNR (dB), mientras más antenas posea el sistema empleado la capacidad aumentará más rápidamente.

Hay que destacar que en el enlace descendente se pueden emplear hasta 8 antenas (MIMO 8x8) y en el ascendente se pueden emplear hasta 4 antenas (MIMO 4x4).

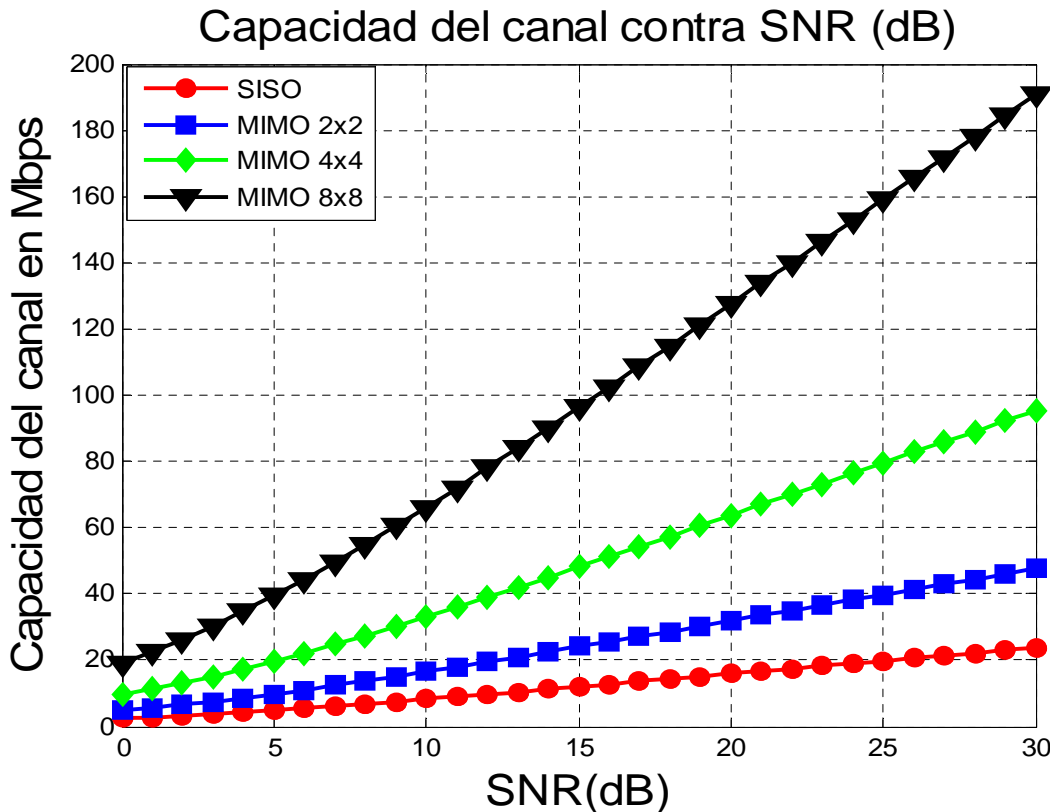


Figura 3.17 Comparación de la capacidad del canal para distintos esquemas de diversidad de antenas.

3.5 PAPR para OFDMA y SCFDMA

El PAPR se obtuvo y se representó con el empleo de la función de distribución acumulada complementaria (CCDF, *Complementary Cumulative Distribution Function*) de PAPR, esta refleja la probabilidad de que el PAPR sea mayor que cierto valor umbral ($PAPR_0$), ($P_r\{PAPR > PAPR_0\}$). En la Figura 3.18 se ratifica que el enlace descendente posee un mayor valor de PAPR, por el empleo de OFDMA, que el enlace ascendente que utiliza SCFDMA, en esta se empleó la modulación QPSK. Como puede apreciarse existe una probabilidad del 10% de tener un PAPR superior 4 dB con SCFDMA y superior a 8.5 dB con OFDMA. Esto confirma que SCFDMA es más eficiente en cuanto a la potencia y es el motivo por el cual fue elegida para el enlace ascendente debido a que en este es muy necesario el ahorro de energía por el uso de baterías por parte de las estaciones móviles. Estas curvas obtenidas se corresponden con las características de LTE lo que se valida al compararlas con las obtenidas en [22] y visualizadas en la Figura A3.1 del ANEXO III.

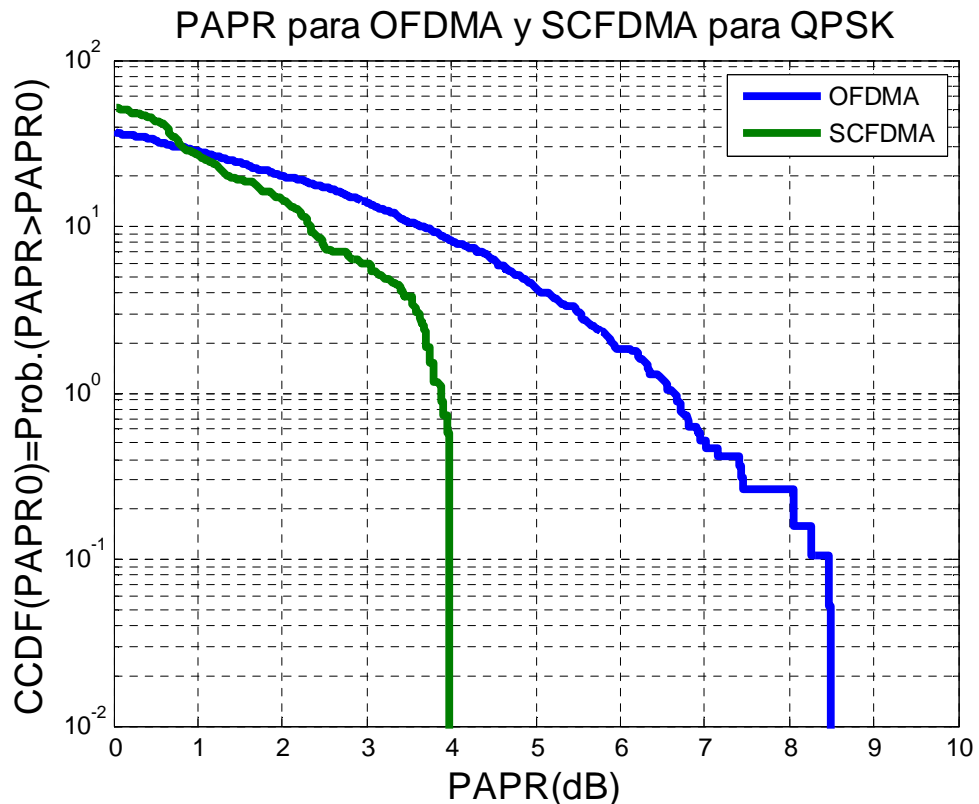


Figura 3.18 Comparación PAPR entre OFDMA y SCFDMA

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede afirmar que, los enlaces LTE ante las limitaciones intrínsecas que posee el canal de radio, mantienen un buen desempeño conjugando la simplificación de su infraestructura y el uso eficiente del espectro. Se lograron resultados satisfactorios, muy próximos a las curvas que se tomaron como referencia, lo que evidencia la confiabilidad de las herramientas del Matlab para LTE.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El estudio realizado permitió comprobar que LTE es una tecnología que supera a las anteriores en cuanto al uso del espectro, la tasa de datos de los usuarios, las tecnologías de nivel físico, el ruido y la robustez ante el efecto multitrayectoria.
- Se logró implementar exitosamente los enlaces descendentes y ascendentes de la capa física, en el entorno de trabajo del *software* MATLAB2014 en su versión 8.3.0.532, empleando las herramientas específicas para LTE.
- El análisis de los resultados alcanzados a partir de las señales obtenidas en ambos enlaces, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, demostró la correcta implementación de los sistemas desarrollados, pues los resultados fueron fieles a los esperados según la teoría.
- En la simulación del enlace descendente se emplearon 181 subportadoras repartidas por igual en 15 Bloque de Recursos Físicos resultando una distribución de 12 subportadoras por PRB lo que se corresponde con la banda de los 3 MHz, pudiéndose obtener la densidad espectral de potencia correspondiente mediante el empleo del método de Welch, lo que posibilitó la evaluación de su desempeño ante factores limitantes como el ruido y los efectos multitrayectoria, con el empleo de las herramientas disponibles en el Matlab.
- En la simulación del enlace ascendente se emplearon 73 subportadoras repartidas por igual en 6 Bloque de Recursos Físicos resultando una distribución de 12 subportadoras por PRB lo que se corresponde con la banda de los 1,4 MHz, pudiéndose obtener la densidad espectral de potencia correspondiente a un usuario mediante el empleo del método de Welch, lo que posibilitó la evaluación de su desempeño ante factores limitantes como el ruido y los efectos multitrayectoria, con el empleo de las herramientas disponibles en el Matlab.
- Se analizó la Magnitud del Vector Error en ambos enlaces lo que posibilitó en el enlace descendente apreciar como experimenta una mejora al incrementar la SNR hasta un valor de 10 dB y al emplear modulaciones de menor número de bits eficaces por símbolo. En el enlace ascendente se apreció una reducción a medida

que se incrementa la SNR. Este parámetro se utiliza por vez primera en nuestro medio.

- Se comprobó el funcionamiento del sistema en términos de la BER lo que permitió observar que se incrementa con el empleo de las modulaciones de mayor orden (16QAM y 64QAM), en ambas técnicas de acceso (OFDMA y SCFDMA) empleadas en el sistema LTE.
- Para la realización de este trabajo se logró dominar la nueva herramienta del Matlab para sistemas LTE, en algunos aspectos bastante compleja, lo que constituye un aporte para futuras simulaciones en el campo de la telefonía móvil.
- Se pudo comprobar mediante la simulación los nuevos adelantos teóricos respecto al uso de las tecnologías MIMO. En particular, la extensión de la Ley de Shannon_ Hartley clásica, obtenida para SISO, al caso de MIMO con un sustancial aumento de la capacidad del canal, aspecto de mucha actualidad en el campo de las comunicaciones modernas.

Recomendaciones

Se recomienda:

1. Hacer un estudio donde se profundice en la influencia que tiene la tecnología MIMO en el desempeño de los enlaces de LTE.
2. Realizar una interfaz gráfica que facilite apreciar la influencia de las limitaciones propias de los sistemas de radiocomunicaciones sobre los sistemas LTE y así facilitar su comprensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramón Agustí Comes et al., *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, and Per Beming, *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*.: Academic Press, 2010.
- [3] Harri Holma and Antti Toskala, *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*.: Wiley & Sons, 2009.
- [4] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker, *LTE-The UMTS Long Term Evolution-From theory to practice*.: Wiley & Sons, 2011.
- [5] Sergi Ramon Ferran, "QoS – Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution," Universidad Politécnica de Cataluña, España, Tesis 2012.
- [6] Interempresas Automatización y Componentes. (2013, noviembre) MathWorks presenta LTE SystemToolbox para Matlab. [Online]. http://www.interempresas.net/Informatica_Industrial/Articulos/116024-MathWorks-presenta-LTE-System-Toolbox-para-Matlab.html
- [7] Víctor Torres, Fermín Esparza, and Francisco Falcone, "Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE," Universidad Pública de Navarra, Navarra, Artículo 2011.
- [8] Tshiteya Dikamba, "Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)," Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Thesis presented in option to the degree of Master in Science in Telecommunications Engineering 2014.
- [9] Magnus Olsson, Shabnam Sultana, Stefan Rommer, Lars Frid, and Catherine Mulligan, *SAE and the Evolved Packet Core: Driving the Mobile Broadband Revolution*, primera edición ed., 2011.
- [10] Sergio García Olmo, "Estudio de la Métrica Cúbica en sistemas multiportadoras," Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, España, Tesis 2014.
- [11] Yanela Varela Méndez, "El Teorema del Límite Central y su importancia para las

- telecomunicaciones," Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Tesis presentada en opción al título de Máster en Sistemas de Telecomunicaciones 2012.
- [12] David Gómez Castillo, "Diseño de capa física para futuros sistemas de comunicaciones móviles," Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Telecomunicaciones de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, Tesis 2011.
- [13] 3GPP. (2013, marzo) 3GPP Technical Specification 36.101 V11.0.0, User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (Release 8). [Online]. www.3gpp.org
- [14] P. Balasundaram and Nilkantha Chakraborty, "Performance Analysis of Extended Channel Models for MIMO LTE SC-FDMA Uplink Systems," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, marzo 2014.
- [15] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423,623-656, July and October 1948.
- [16] Christian Mehlführer et al. (2011, enero) The Vienna LTE simulators – Enabling reproducibility in wireless communications research. [Online]. <http://asp.eurasipjournals.com/content/2011/1/29>
- [17] Amit Kumar, Jyotsna Sengupta, and Yun-fei Liu, "3GPP LTE: The future of mobile broadband," *Wireless Pers Commun*, pp. 671–686, febrero 2013.
- [18] Juan Guerrero Martínez, "Estimación espectral," Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, Valencia, Artículo 2011.
- [19] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, no.2, pp. 70- 73, june 1967.
- [20] Dora Juliana Martínez Cerón and Edwin Humberto Muñoz Ramírez, "Modelado de sistemas de transmisión OFDM y GMSK para comunicación de datos por líneas eléctricas PLC (Powerline Communication)," Universidad del Cauca -Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Colombia, Artículo 2012.
- [21] Ali Jemmali, Jean Conan, and Mohammad Torabi, "Bit Error Rate Analysis of MIMO Schemes in LTE Systems," Department of Electrical Engineering, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, Artículo 2013.
- [22] Murtadha Ali Nsaif Shukur, Dr. Kuldip Pahwa, and Er. Ankur Singhal, "Implementing SC-FDMA

& OFDMA in Matlab," University, Mullana, Haryana, India, Artículo 2013.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

| | |
|---------|--|
| 3GPP | <i>3rd Generation Partnership Project</i> |
| ARQ | <i>Automatic Repeat Request</i> |
| AWGN | <i>Additive White Gaussian Noise</i> |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> |
| BPSK | <i>Binary-Phase Shift Keying</i> |
| CDMA | <i>Code Division Multiple Access</i> |
| CQI | <i>Channel Quality Indicator</i> |
| DFT | <i>Discrete Fourier Transform</i> |
| DHCP | <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> |
| DNS | <i>Domain Name System</i> |
| E-UTRAN | <i>Evolved UTRAN</i> |
| eNB | <i>Evolved Node B</i> |
| EPC | <i>Evolved Packet Core</i> |
| EPS | <i>Evolved Packet System</i> |
| EVM | <i>Error Vector Magnitude</i> |
| FEC | <i>Forward Error-Correcting Coding</i> |
| FDD | <i>Frequency Division Duplex</i> |
| FPC | <i>Fractional Power Control</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> |
| H-ARQ | <i>Hibryd Automatic Repeat Request</i> |
| HSPA | <i>High Speed Packet Access</i> |
| ICI | <i>Inter Carrier Interference.</i> |

| | |
|---------|--|
| IDFT | <i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> |
| ISI | <i>Inter-Symbol Interference</i> |
| LTE | <i>Long Term Evolution</i> |
| MCS | <i>Modulation and Coding Scheme</i> |
| MIMO | <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| P-SCH | <i>Primary Synchronization</i> |
| PAPR | <i>Peak to Average Power Ratio</i> |
| PBCH | <i>Physical Broadcast Channel</i> |
| PCFICH | <i>Physical Control Format Indicator Channel</i> |
| PDCCH | <i>Physical Downlink Control Channel</i> |
| PDSCH | <i>Physical Downlink Shared Channel</i> |
| PRACH | <i>Physical Random Access Channel</i> |
| PRB | <i>Physical Resource Block</i> |
| PUCCH | <i>Physical Uplink Control Channel</i> |
| PUSCH | <i>Physical Uplink Shared Channel</i> |
| QAM | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> |
| QPSK | <i>Quaternary-Phase Shift Keying</i> |
| RS | <i>Reference Signal</i> |
| RSP | <i>Reference Signal Primary</i> |
| RSS | <i>Reference Signal Secondary</i> |
| RNTI | <i>Radio Network Temporary Identifier</i> |
| S-SCH | <i>Secondary Synchronization</i> |
| SC-FDMA | <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> |
| SCH | <i>Synchronization</i> |
| SIM | <i>Subscriber Identity Module</i> |

| | |
|------|--|
| SISO | <i>Simple Input Simple Output</i> |
| TDD | <i>Time Division Duplex</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telephone System</i> |
| UTRA | <i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> |

ANEXOS

Anexo I Valores de EVM por símbolo en las constelaciones QPSK, 16QAM y 64QAM para diferentes valores de SNR. Tomada de [7]

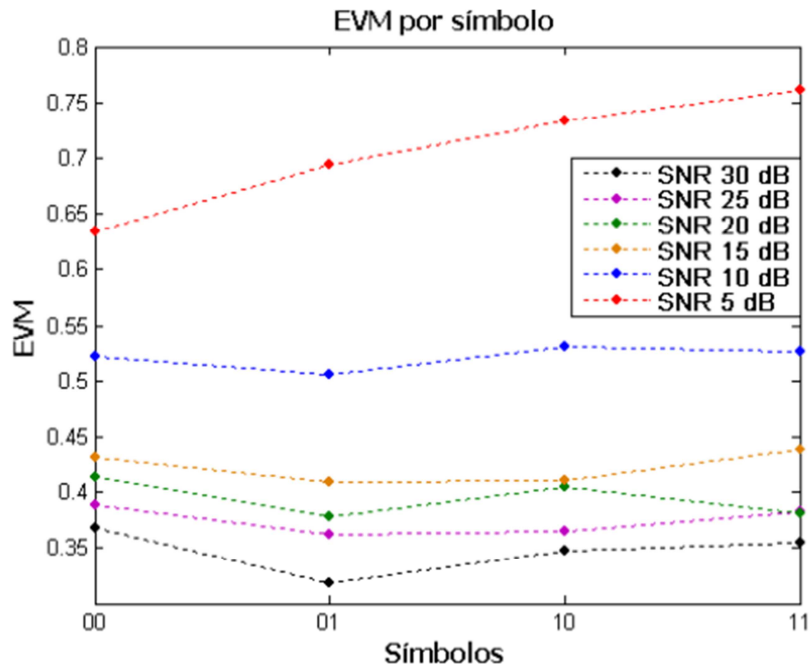


Figura A1.1 EVM por símbolos para QPSK

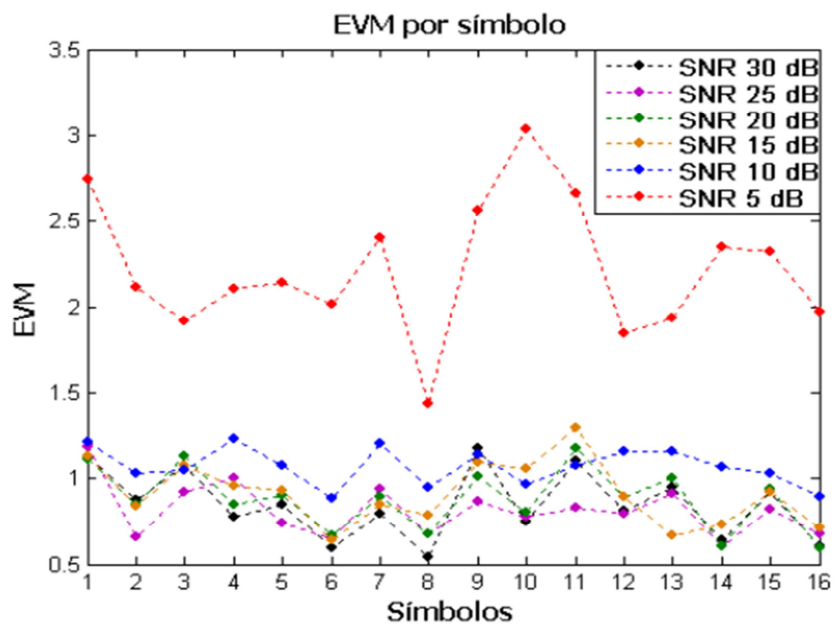


Figura A1.2 EVM por símbolos para 16QAM

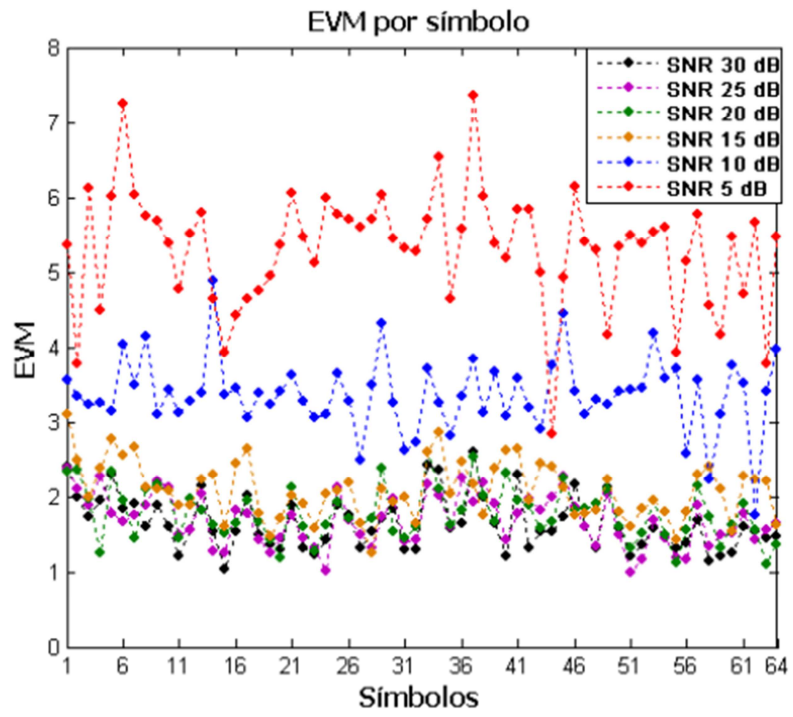


Figura A1.3 EVM por símbolos para 64QAM

Anexo II Gráficas BER vs SNR de análisis para tecnología MIMO en sistemas LTE.
Tomadas de [21].

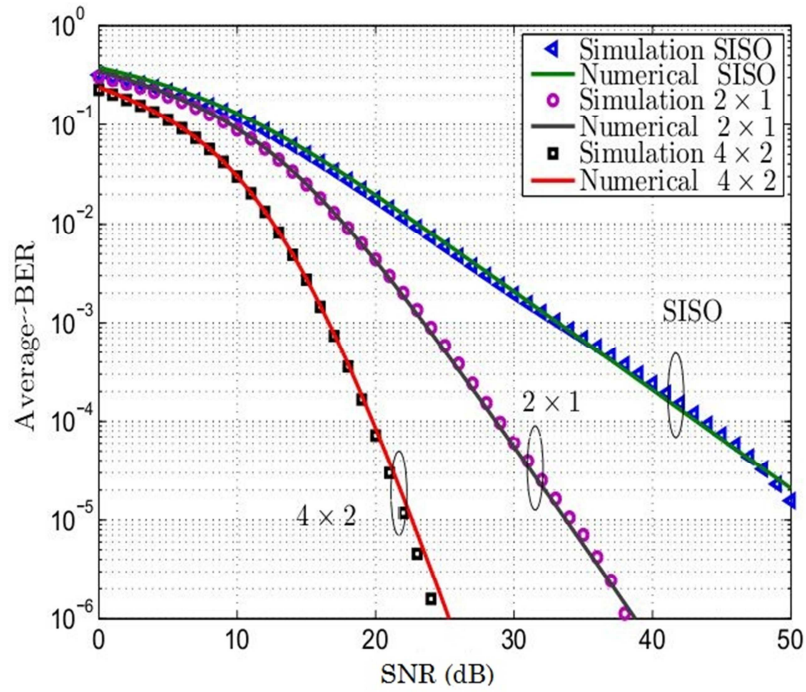


Figura A2.1 BER para 16QAM

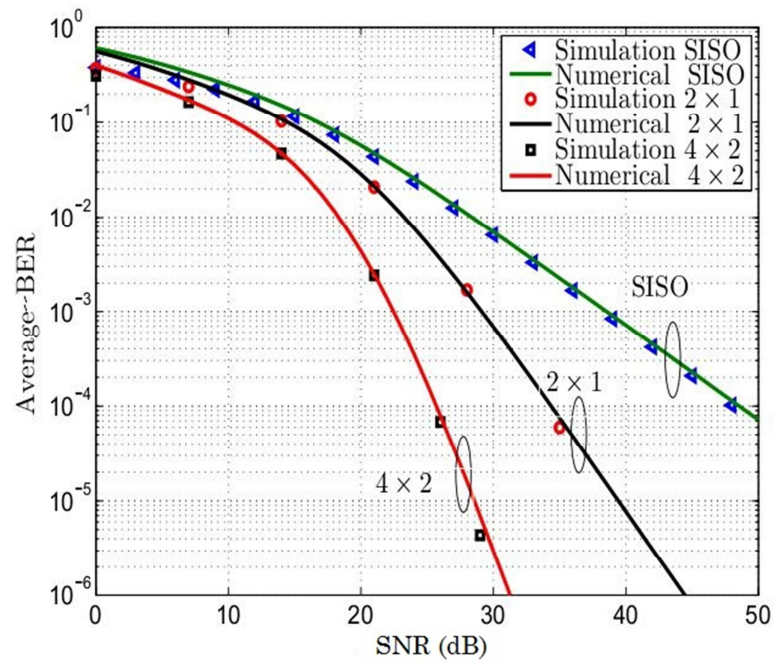


Figura A2.2 BER para 64QAM

Anexo III Gráfica de Implementación de SCFDMA y OFDMA en Matlab. Tomadas de [22].

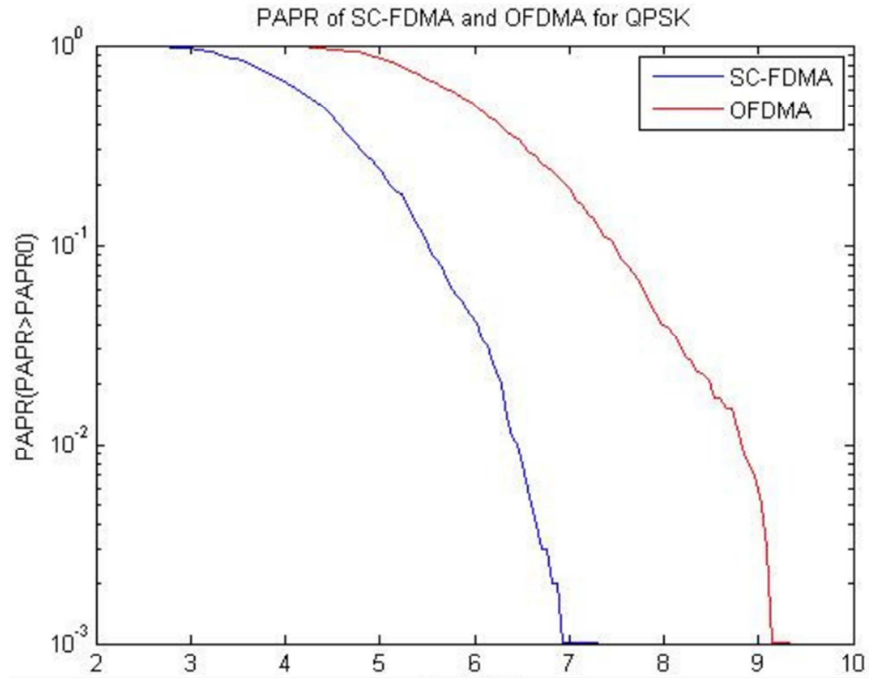


Figura A3.1 PAPR para SCFDMA y OFDMA con QPSK