

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ENLACE DE BAJADA DE LA EVOLUCION A LARGO TERMINO (LTE)

PHYSICAL PERFORMANCE ANALYSIS IN THE DOWNLINK OF LONG TERM EVOLUTION (LTE)



AUTOR

JAMESON SAMIR ZÚÑIGA MUÑOZ
Ingeniero (c) en Electrónica y Telecomunicaciones
*Universidad del Cauca
Estudiante
jszuniga@unicauca.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

FERNANDO DARÍO CÓRDOBA MUÑOZ
Ingeniero (c) en Electrónica y Telecomunicaciones
*Universidad del Cauca
Estudiante
fcordoba@unicauca.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

VÍCTOR MANUEL QUINTERO FLÓREZ
Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones
*Universidad del Cauca
Docente y Coordinador del Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL)
Vflorez@unicauca.edu.co
COLOMBIA

* INSTITUCIÓN

Universidad del Cauca
UNICAUCA
Universidad pública
Carrera 2 con Calle 15 Norte
Esquina, Sector Tulcán.
Edificio de Ingenierías.
Popayán, Cauca
decafiet@unicauca.edu.co
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: La presente investigación se basa en los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo de grado titulado análisis del desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE, realizado por Fernando Córdoba M, Jameson S. Zúñiga M. y dirigida por Víctor Manuel Quintero Flórez [1]. En el cual se evaluó y analizó la operación y el desempeño de los diferentes esquemas de modulación, tasas de codificación y la técnica de transmisión a nivel físico en banda base de LTE en el enlace de bajada, ante diferentes modelos de canal por medio de simulación, usando la herramienta systemvue® de agilent technologies®.

RECEPCIÓN: Junio 8 de 2013

ACEPTACIÓN: Septiembre 16 de 2013

TEMÁTICA: Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Telecomunicaciones y Telemática

TIPO DE ARTÍCULO: Artículo de Investigación Científica e Innovación

RESUMEN ANALÍTICO

En el presente artículo se evalúa y analiza el desempeño a nivel físico de la Tecnología de Evolución a Largo Termino (LTE, Long Term Evolution) del enlace de bajada, en banda base, modo Duplexación por División de Frecuencia (FDD, Frequency Division Duplexing) – sistema de antena de Única Entrada y Única Salida (SISO, Single Input Single Output), usando la herramienta de simulación SystemVue™ de Agilent Technologies™, el cual es un software con bloques y funciones básicas que permiten implementar un modelo de simulación que cumple con las especificaciones del Release 8 del Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, Third Generation Partnership Project) y permite modificar parámetros con el fin de analizar y evaluar su desempeño en diferentes configuraciones y condiciones de canal.

PALABRAS CLAVES: LTE release 8, systemvue, desempeño a nivel de enlace.

ANALYTICAL SUMMARY

This paper shows the physical layer performance evaluation and analysis of Long Term Evolution (LTE) in the downlink, in baseband, Frequency Division Duplexing (FDD) mode – and Single Input and Single Output (SISO) antenna system, using SystemVue™, an Agilent Technologies simulation tool, which is a software with basic blocks and functions that allow to implement a simulation model according to the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Release 8 and modify parameters to evaluate and analyze its performance in different configurations and channel conditions.

KEYWORDS: LTE Release 8, SystemVue®, link level physical performance.

INTRODUCCIÓN.

La tecnología evolución a largo término (LTE) es un estándar especificado por el proyecto de cooperación en sistemas de tercera generación (3GPP) en el *Release 8*, cuyo objetivo principal fue crear una arquitectura mucho más plana y sencilla, definida por el 3GPP como Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*), la cual está soportada totalmente en el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), con un número limitado de nodos e interfaces que permiten disminuir los tiempos de señalización y procesamiento entre nodos [2]. Además la tecnología LTE cuenta con un planificador de paquetes (*packet scheduler*) que cumple con funciones de asignación dinámica de recursos, balanceo de carga, gestión de movilidad (*mobility management*), lo cual le permite adaptarse rápidamente a las condiciones variables del canal radio por medio de la selección de diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación. LTE hace uso en el enlace de bajada de la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA,

Orthogonal Frequency División Multiple Access) y en el enlace de subida de la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency División Multiple Access*) [3]. Cabe destacar también que LTE opera con anchos de banda variables que van desde 1.25 hasta 20 MHz y velocidades de transmisión de datos teóricos de hasta 100 Mbps para el enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida en un ancho de banda de 20 MHz. LTE emplea: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación en Amplitud y Cuadratura de 16 niveles (16 QAM, *16 Quadrature Amplitude Modulation*), Modulación en Amplitud y Cuadratura de 64 niveles (64 QAM, *64 Quadrature Amplitude Modulation*), codificación turbo, y sistemas de antenas de Entradas Múltiples y Salidas Múltiples (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), logrando de esta manera incrementar la eficiencia espectral y la capacidad del sistema [2].

Teniendo en cuenta la importancia que tiene LTE en los sistemas comunicaciones móviles, surgió la necesidad

de realizar una evaluación y análisis del desempeño del enlace de bajada de LTE en un sistema de única entrada y única salida (SISO) en modo de duplexación por división de frecuencia (FDD) para diferentes escenarios considerando los efectos del Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), la multitrayectoria en el canal radio y el corrimiento en frecuencia por el desplazamiento del terminal de usuario, con el fin de observar el desempeño en términos de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) y el *throughput*.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta el nivel físico del enlace de bajada de LTE teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 8* del 3GPP; en la sección III se presenta el modelo de simulación implementado; en la sección IV se presenta los escenarios planteados y los resultados obtenidos; finalmente en la sección V se presenta las conclusiones.

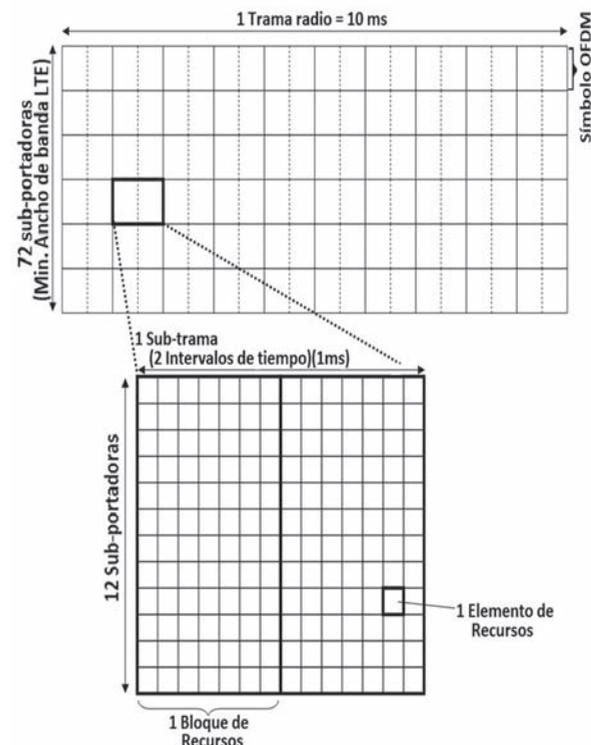
1. NIVEL FÍSICO DEL ENLACE DE BAJADA DE LTE.

LTE tiene una estructura de recursos en los dominios de tiempo y frecuencia. En el dominio del tiempo la duración de una trama radio es de 10 ms es decir, una trama en LTE para modo FDD contiene 10 subtramas de 1ms. Cada subtrama está compuesta de dos intervalos de tiempo de 0.5 ms cada uno para un total de 20 intervalos de tiempo y una duración de 10 ms. En cada intervalo de tiempo se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM, siete símbolos en el caso de prefijo cíclico (PC, *Cyclic Prefix*) normal, o seis si el prefijo cíclico es extendido, con una duración de símbolo de 66, 7ms [2]. En el dominio de la frecuencia, los recursos se agrupan en unidades de 12 subportadoras separadas 15 KHz, ocupando así un total de 180 kHz [4]. Se denomina un Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*) a la unidad de asignación de recursos radio del eNodoB a un Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*). Los bloques de recursos poseen una unidad más pequeña denominada Elementos de Recursos (RE, *Resource Elements*), que consiste en un símbolo OFDM en el dominio del tiempo y una subportadora en el dominio de la frecuencia como se muestra en la figura 1.

LTE opera con dos esquemas de duplexación: FDD y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*). El esquema utilizado para este artículo es FDD, en el cual se designa dos canales en frecuencia

distintos para la comunicación, uno para el enlace de subida y otro para el enlace de bajada.

FIGURA 1. Estructura de recursos tiempo-frecuencia [5].



Fuente: LTE, the UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice [5].

La técnica de transmisión utilizada en el enlace de bajada de LTE es OFDMA. Esta técnica de acceso subdivide el ancho de banda disponible para la transmisión de señales en múltiples subportadoras de banda estrecha, ordenadas en forma ortogonal y separadas entre sí 15 KHz, brindando robustez frente a los desvanecimientos rápidos y facilitando la ecualización en recepción [5]. Las ventajas que ofrece OFDMA son:

- Diversidad en frecuencia.
- Diversidad multiusuario
- Robustez frente al multitrayecto.
- Eficiencia espectral.

Los datos generados en niveles superiores son transportados en canales lógicos, los cuales se mapean en canales de transporte y estos a su vez se mapean en canales físicos en el nivel físico [6].

Los canales lógicos se dividen inicialmente en canales de tráfico y control, los cuales describen el tipo de información que transmiten a través de la interfaz radio, los cuales son: Canal de Control Dedicado (DCCH, *Dedicated Control Channel*), Canal de Tráfico Multidifusión (MTCH, *Multicast Traffic Channel*), Canal de Control de Difusión (BCCH, *Broadcast Control Channel*), Canal de Control de Aviso o Notificación (PCCH, *Paging Control Channel*), Canal de Control Común (CCCH, *Common Control Channel*), Canal de Tráfico Dedicado (DTCH, *Dedicated Traffic Channel*) y el Canal de Control Multidifusión (MCCH, *Multicast Control Channel*).

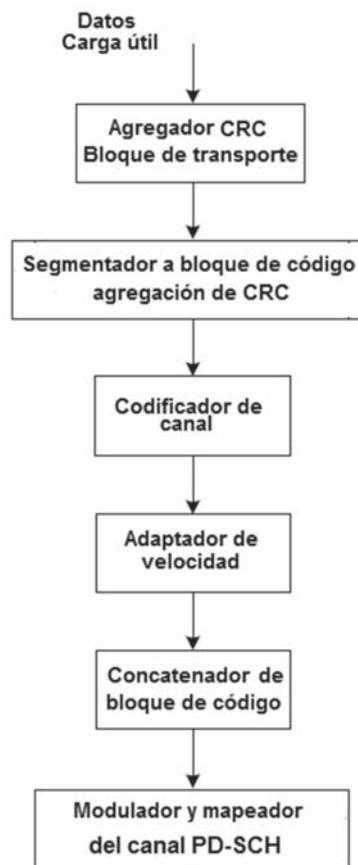
Los canales de transporte se encargan de definir las características de la información que se transmite por la interfaz radio, los cuales son: Canal de Difusión (BCH, *Broadcast Channel*), Canal Compartido para el Enlace de Bajada (DL-SCH, *Downlink Shared Channel*), Canal de Aviso o notificación (PCH, *Paging Channel*) y el Canal de Multidifusión (MCH, *Multicast Channel*).

Los canales físicos se utilizan para transportar la información destinada a los usuarios situados en la zona de cobertura del correspondiente eNodeB y viceversa, así como de los mecanismos de señalización y control que posibilitan una transmisión eficiente de la información [2], los cuales son: Canal Físico de Control del Enlace de Bajada (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*), Canal Físico de Difusión (PBCH, *Physical Broadcast Channel*), Canal Físico de Multidifusión (PMCH, *Physical Multicast Channel*), Canal Físico Indicador de HARQ (PHICH, *Physical HARQ Indicator Channel*) y el Canal Físico Compartido del Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*).

El canal PDSCH es asignado al usuario de forma dinámica por el planificador de paquetes, transporta información de usuario y soporta esquemas de modulación QPSK, 16QAM o 64QAM y tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 o 5/6 [5].

En la figura 2, se muestra cada uno de los procedimientos que intervienen en el canal PDSCH, los cuales son: adición de CRC al bloque de transporte, segmentador a bloques código, codificador de canal, adaptador de velocidad y concatenador de bloques código.

FIGURA 2. Estructura del proceso del PDSCH [7].



Fuente: 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; "Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Multiplexing and Channel Coding [7].

El proceso funcional de los bloques que conforman el canal PDSCH se describe a continuación:

A. Agregador del CRC

La detección de errores en los canales de transporte en recepción lo proporciona el uso del CRC y los bits de paridad que se adjuntan al bloque de transporte y son generados por los polinomios para un CRC de longitud $L = 24$.

B. Segmentador a bloques código y agregación de CRC

Si la secuencia de bits de entrada del bloque de transporte es mayor que el tamaño máximo de código bloque de código (6144 bits), se lleva a cabo la segmentación y se añade una secuencia CRC adicional de 24 bits [8].

C. Codificador de canal

La codificación utilizada en el PDSCH es la codificación turbo, la cual se basa en dos Codificadores Convolucionales Concatenados en Paralelo (PCCC, *Parallel Concatenated Convolutional Code*) de tasa de codificación 1/2 [9]. Por cada bit de entrada se obtienen 3 bits de salida, uno sistemático y dos de paridad, es decir es un codificador con tasa de codificación igual a 1/3.

D. Adaptador de velocidad

La finalidad del Adaptador de Velocidad (RM, *Rate Matching*) es ajustar el tamaño del bloque de código a los recursos físicos asignados.

E. Concatenador de bloques código

Este proceso consiste en la concatenación secuencial de los diferentes bloques código.

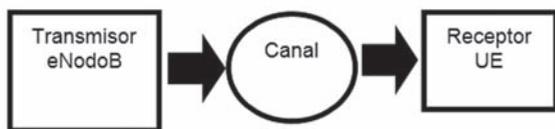
F. Modulador y mapeador del canal PDSCH

En la modulación del canal PDSCH los datos de entrada se modulan y se mapean en símbolos OFDMA, lo que significa que modulan a cada una las subportadoras. Esta modulación puede ser: QPSK, 16QAM o 64QAM.

2. MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL ENLACE DE BAJADA A NIVEL FÍSICO DE LTE – SISTEMA SISO.

El modelo de simulación se basa en las especificaciones del *Release 8* del 3GPP y tiene en cuenta los componentes generales de un sistema telecomunicaciones: transmisor, canal y receptor, como se muestra en la figura 3.

FIGURA 3. Modelo general del sistema.

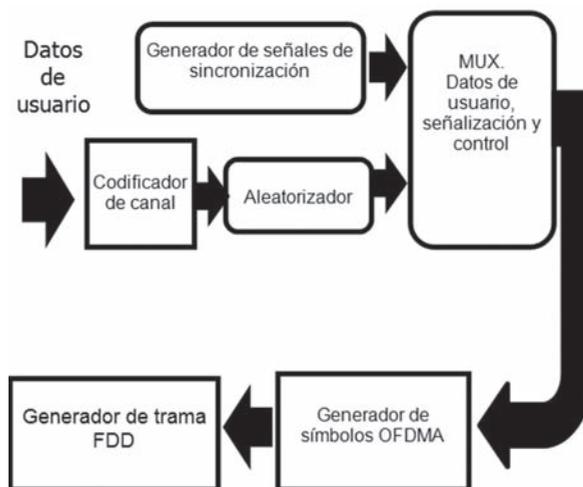


Cada componente del sistema está constituido por diferentes bloques como se muestra a continuación.

2.1 TRANSMISOR.

La figura 4 ilustra el transmisor. A la entrada se genera una señal binaria pseudoaleatoria, la cual representa la información de usuario. Esta señal es procesada para formar un conjunto de símbolos OFDMA, los cuales son organizados en tramas para su transmisión a través de un canal inalámbrico afectado por multitrayecto y ruido Gaussiano blanco aditivo (AWGN).

FIGURA 4. Bloques internos del transmisor.

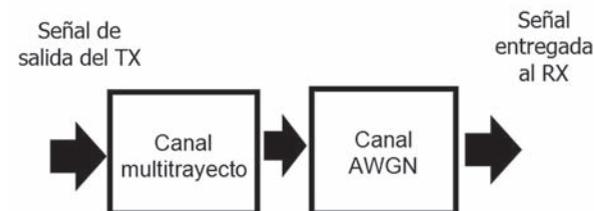


- Codificación de canal.
- Aleatorizador.
- Multiplexación de datos de usuario, señalización y control.
- Generador de símbolos OFDMA.
- Generador de trama FDD.

2.2 CANAL.

La figura 5 representa el modelo del canal, por el cual se transmite una señal OFDMA, donde se consideran los efectos de los canales AWGN y multitrayectoria.

FIGURA 5. Bloques internos del canal.



El canal se modifica de acuerdo a los modelos de canal definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*) para el canal multitrayecto:

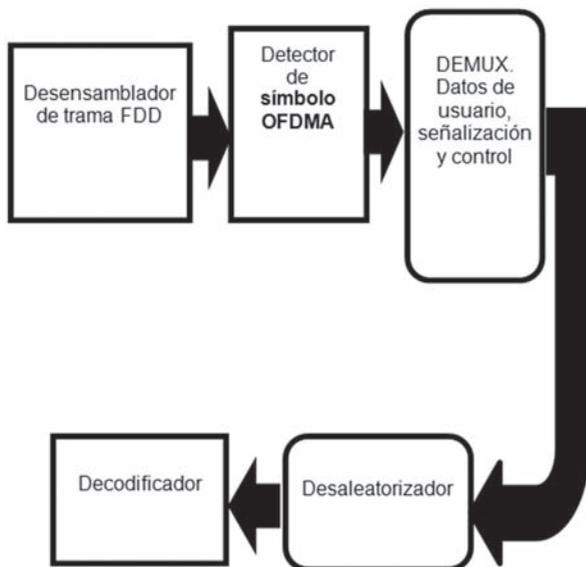
- Peatonal Extendido A 5 Hz (EPA5, *Extended Peatonal A 5 Hz*).
- Urbano Típico Extendido 70 Hz (ETU, *Extended Typical Urban 70 Hz*).
- Vehicular Extendido A 70 Hz (EVA, *Extended Vehicular A 70 Hz*).
- Urbano Típico Extendido 300 Hz (ETU, *Extended Typical Urban 300 Hz*).

Finalmente se adiciona AWGN.

2.3 RECEPTOR.

La figura 6 ilustra el receptor, al cual llega una señal OFDMA afectada por multitrayecto y AWGN, sobre la cual se realizan procesamientos inversos a los realizados en transmisión para recuperar la señal original.

FIGURA 6. Bloques internos del receptor.



La señal en el receptor pasa por los siguientes bloques:

- Desensamblador de trama FDD.
- Detector de símbolo OFDMA.
- Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.
- Desaleatorizador.
- Decodificador.

3. ESCENARIOS, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En la tabla 1 se definen los escenarios para la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de la tecnología LTE en el enlace de bajada - sistema SISO.

TABLA 1. Escenarios de Estudio.

Escenarios	Descripción
Escenario 1	Considera los diferentes tipos de canal multitrayecto y AWGN.
Escenario 2	Considera los diferentes anchos de banda del canal.
Escenario 3	Considera las diferentes tasas de codificación de canal.
Escenario 4	Considera los diferentes esquemas de modulación.

Los escenarios son implementados en la herramienta SystemVue™, cuya configuración se basa en lo especificado en el *Release 8* del 3GPP y corresponde a una simulación a nivel de enlace en banda base, donde la frecuencia definida sirve para determinar el traslado en frecuencia del espectro y el corrimiento Doppler o velocidad de desplazamiento. Para los escenarios propuestos se configuraron los parámetros generales presentados en la tabla 2.

TABLA 2. Parámetros Generales de Configuración del Sistema.

Parámetros generales de configuración	
Tipo de sistema	SISO
Frecuencia portadora	2.5 GHz
Número de usuarios	1 usuario
Número de tramas	1000
Tipo de trama	FDD
Prefijo cíclico	Normal

Para la evaluación y análisis de desempeño del enlace de bajada de LTE, se recurrió a hacer la medida BER, BLER y *Throughput* en función de la SNR, empleando los modelos de canal multitrayecto EPA5, EVA70, ETU70, ETU300 y el modelo de canal AWGN, para diferentes anchos de banda, esquemas de modulación y tasas de codificación. Para los modelos de canal se definió corrimiento Doppler bajo, medio y alto, con los valores 5, 70 y 300 Hz respectivamente [10]. La velocidad de desplazamiento promedio del UE está relacionada con la frecuencia portadora y el corrimiento Doppler asociado al modelo de canal multitrayecto configurado, calculada mediante la ecuación 1.

$$v = \frac{f_D \times C}{f_c} \tag{1}$$

Donde:

f_c , es la frecuencia portadora en Hz.

C , es la velocidad de la luz igual a 3×10^8 m/s.

f_D , es la frecuencia Doppler en Hz.

La tabla 3 determina la velocidad de desplazamiento promedio para la frecuencia de operación definida y el corrimiento Doppler haciendo uso de la ecuación 1.

TABLA 3. Velocidad Promedio de Desplazamiento de los UE.

Canal	Corrimiento Doppler [Hz]	Velocidad [Km/H]
EPA5	5	2.16
EVA70	70	30.24
ETU70	70	30.24
ETU300	300	129.6

A continuación se analizará los 4 escenarios descritos en la tabla 1.

3.1 ESCENARIO 1.

La tabla 4 muestra los parámetros del escenario 1 configurados para la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO.

TABLA 4. Parámetros para el Escenario 1.

Parámetro	Configuración
Ancho de banda	15 MHz (75 RB)
Modulación	16QAM
Modelo de canal	AWGN, EPA5, EVA70, ETU70, ETU300

El objetivo de este escenario es considerar los efectos del canal multitrayecto y AWGN sobre el desempeño del enlace de bajada de LTE, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 5 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo de 0.1

especificada por el 3GPP [11].

TABLA 5. SNR, BER y *Throughput* para el escenario 1.

Canal	AWGN	EPA 5	EVA 70	ETU 70	ETU 300
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	4	19	35	--	--
BER	30 E-6	2 E-6	40 E-6	--	--
Throughput [Mbps]	13	11	11	--	--

La tabla 6 muestra el valor de BLER más bajo para cada uno de los modelos de canal en los cuales no se alcanzó la BLER objetivo, adicionalmente muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR asociado a la BLER obtenida.

TABLA 6. BLER, SNR, BER y *Throughput* para ETU70 y ETU300 del escenario 1.

Canal	ETU70	ETU300
BLER	0.286	0.386
SNR [dB]	33	34.1
BER	263 E-6	324.8 E-6
Throughput [Mbps]	9.13	7.78

Las figuras 7, 8 y 9 muestran el comportamiento de la BLER, BER y *throughput* respectivamente para los modelos de canal AWGN y multitrayecto variando los valores de SNR.

FIGURA 7. BLER vs SNR para el escenario 1.

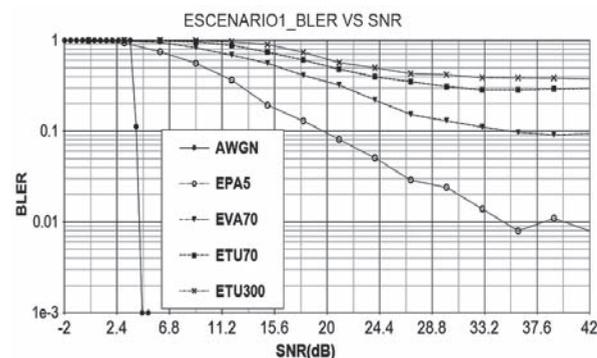


FIGURA 8. BER vs SNR para el escenario 1.

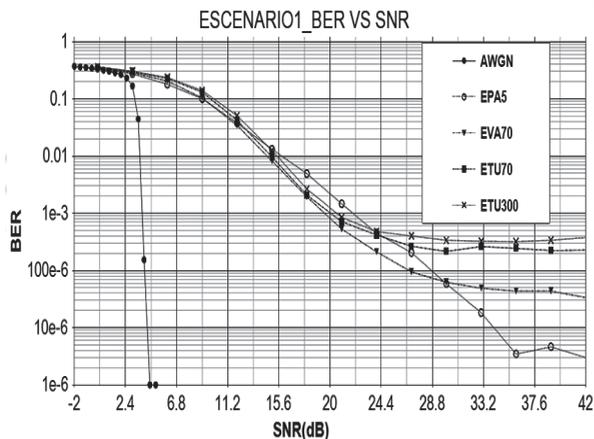
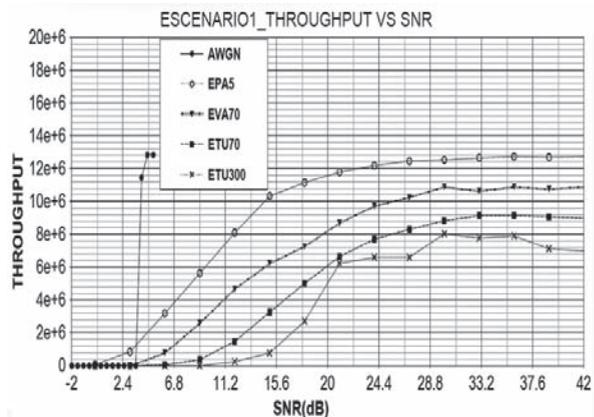


FIGURA 9. Throughput vs SNR para el escenario 1.



De las tablas 5 y 6 y las figuras 7, 8, y 9 se observan los siguientes resultados:

El valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de -2 dB a 1 dB para todos los canales evaluados, indicando que todos los bloques transmitidos contienen errores, y el valor de BLER disminuye para todos los canales multitrayecto, en el intervalo SNR de 1 dB a 19 dB. Al considerar cada uno de los modelos de canal multitrayecto, el canal EPA5 alcanza la BLER objetivo (0.1); con valores de BER y *throughput* iguales a 0.002 y 11 Mbps respectivamente, para una SNR igual a 19 dB; así mismo, el canal multitrayecto EVA70 alcanza la BLER objetivo (0.1), con valores de BER y *throughput* iguales a 40E-6 y 11 Mbps respectivamente, para una

SNR de 35 dB; A diferencia de los anteriores modelos de canal, los canales multitrayecto ETU70 y ETU300 no alcanzan la BLER objetivo (0.1) y solo se logra un valor de BLER igual a 0.286 para el canal ETU70, donde se obtiene una BER y *throughput* de 263E-6 y 9.13 Mbps para una SNR igual a 33 dB y el valor de BLER de 0.386 para el canal multitrayecto ETU300, donde la BER y el *throughput* son iguales a 324.8E-6 y 7.78 Mbps para una SNR de 34.1 dB.

Cuando se aplica el canal AWGN los valores de BLER y BER son iguales a 0 para una SNR mayor o igual a 4.5 dB y alcanza la BLER objetivo (0.1), con valores de BER y *throughput* iguales a 1E-6 y 12 Mbps respectivamente, para una SNR de 4 dB. Además con el canal AWGN, se obtiene el máximo valor de *throughput* igual a 12.84 Mbps para una SNR de 4.5 dB, lo cual confirma que este canal modela las mejores condiciones de propagación y permite al sistema lograr el mejor desempeño.

Finalmente el valor de BER es constante para una SNR superior o igual a 30 dB, al emplear los canales multitrayecto EVA70, ETU70, ETU300 y para una SNR mayor a 42 dB en el canal multitrayecto EPA5. Los valores obtenidos de BER se definen como BER irreducible, los cuales son debidos a multitrayectoria y no se reducen con incremento de la SNR [9].

3.2 ESCENARIO 2.

La tabla 7 muestra los parámetros del escenario 2 configurados para la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO.

TABLA 7. Parámetros para el escenario 2.

Parámetro	Configuración
Modulación	64QAM
Anchos de banda	5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz
Modelo de canal	EVA70

El objetivo de este escenario es considerar los efectos de los diferentes anchos de banda sobre el desempeño del enlace de bajada de LTE, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 8 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo.

TABLA 8. SNR, BER y *Throughput* para el escenario 2.

EVA70				
Anchos de banda	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	32	--	--	--
BER	350 E-6	--	--	--
Throughput [Mbps]	5.51	--	--	--

La tabla 9 muestra el valor de BLER más baja alcanzada en cada uno de los anchos de banda para los que no se alcanzó la BLER objetivo. Además se muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR teniendo en cuenta la BLER obtenida.

TABLA 9. Resultados para los Anchos de Banda de 10, 15 y 20 Mhz del escenario 2.

EVA70			
Anchos de banda	10 MHz	15 MHz	20 MHz
BLER	0.15	0.191	0.245
SNR [dB]	36	36	36
BER	163.7E-6	98.75E-6	99.65E-6
Throughput [Mbps]	10.81	17.54	20.4

Las figuras 10, 11 y 12 muestran el comportamiento de la BLER, BER y *throughput* en el canal EVA70 para los diferentes anchos de banda del enlace, variando los valores de SNR.

FIGURA 10. BLER vs SNR para el escenario 2.

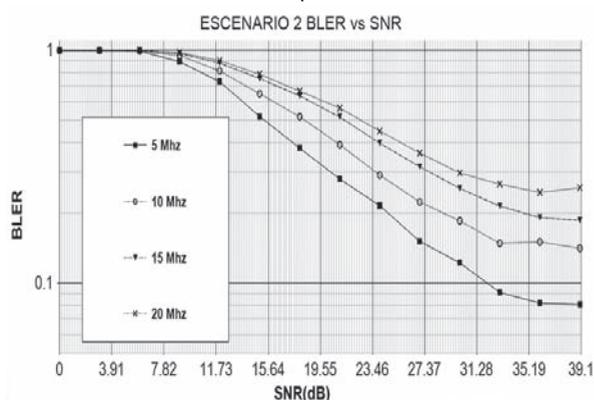


FIGURA 11. BER vs SNR para el escenario 2.

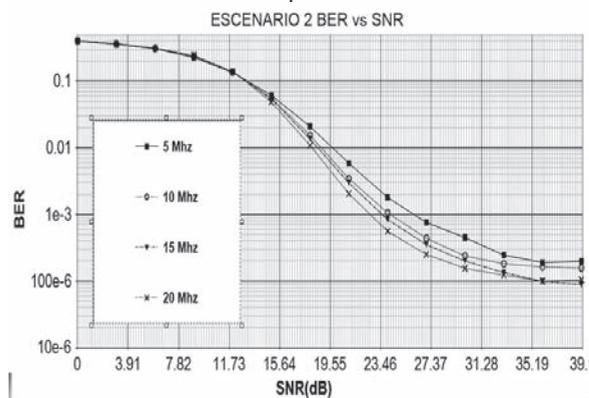
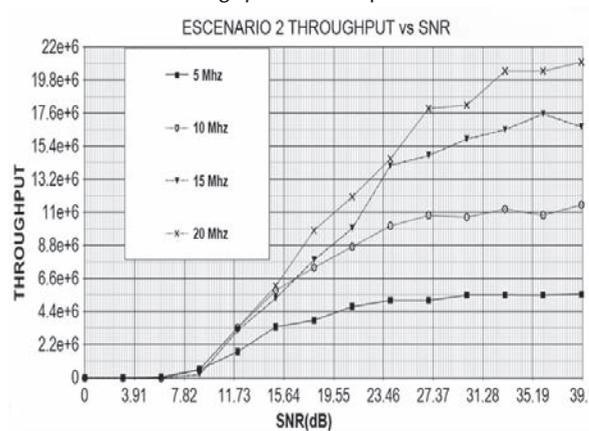


FIGURA 12. *Throughput* vs SNR para el escenario 2.



De las tablas 8 y 9 y las figuras 10, 11 y 12 se observan los siguientes resultados:

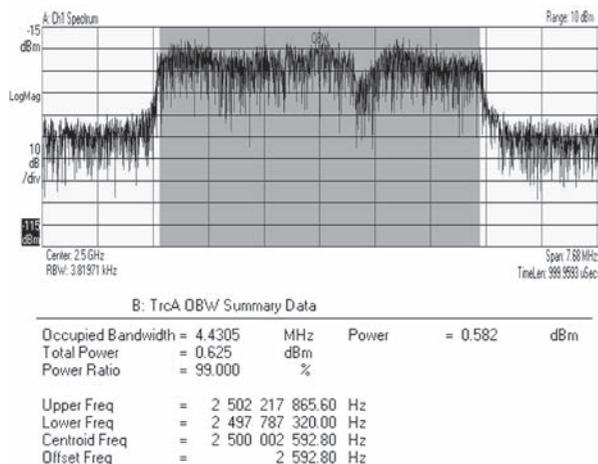
El valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de 0 dB a 6 dB cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace y tiende a un valor constante para una SNR mayor a 33 dB. Con el ancho de banda de 5 MHz se alcanza la BLER objetivo (0.1), obteniendo valores de BER y *throughput* iguales a 350E-6 y 5.51 Mbps respectivamente para una SNR de 32 dB. Para los anchos de banda de 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz, no se alcanza la BLER objetivo (0.1) y solo se logran valores de BLER iguales a 0.15, 0.191, 0.245 y de BER de 163E-6, 98.75E-6 y 99.65E-6 respectivamente, para una SNR igual a 36 dB. El valor de *throughput* es igual a 10.81 Mbps, 17.54 Mbps y 20.4 Mbps para una SNR igual a 36 dB cuando se consideran los anchos de banda del enlace de 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente.

Finalmente el *throughput* alcanza su mayor valor para una SNR mayor a 15 dB, con un ancho de banda de 20 MHz como era de esperar.

A continuación se muestran los espectros para cada uno de los anchos de banda utilizados en este escenario.

La figura 13 muestra el espectro para un ancho de banda de 5 MHz después de pasar por el canal.

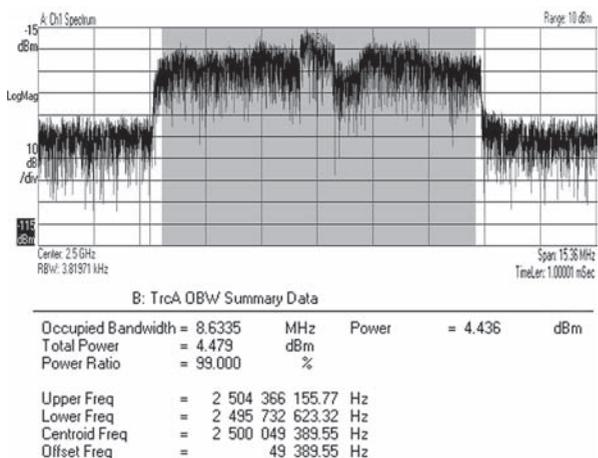
FIGURA 13. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 5 MHz.



El ancho de banda ocupado es de 4.4305 MHz, centrado en 2.5 GHz, con una frecuencia límite inferior igual a 2.4977 GHz y una frecuencia límite superior igual a 2.5022 GHz, como se muestra en la figura 13.

La figura 14 muestra el espectro para un ancho de banda de 10 MHz después de pasar por el canal.

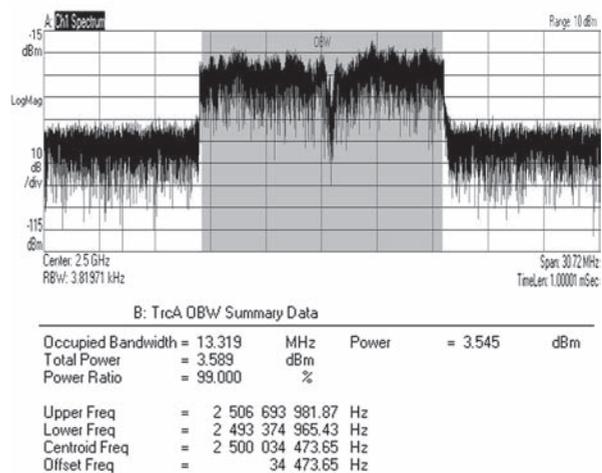
FIGURA 14. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 10 MHz.



El ancho de banda ocupado es de 8.6335 MHz, centrado en 2.5 GHz, con una frecuencia límite inferior de 2.4957 GHz y una frecuencia límite superior de 2.5043 GHz, como se muestra en la figura 14.

La figura 15 muestra el espectro para un ancho de banda de 15 MHz después de pasar por el canal.

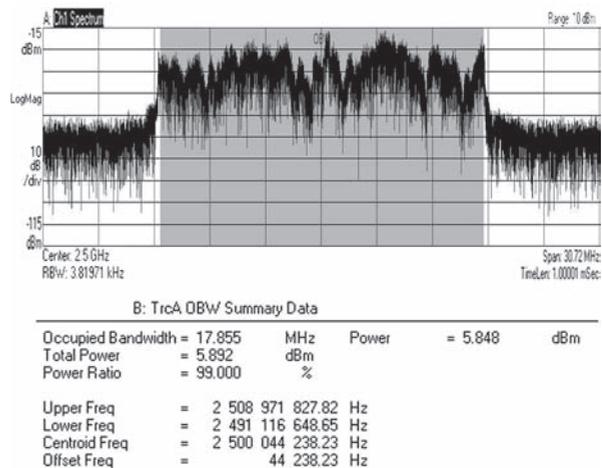
FIGURA 15. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 15 MHz.



El ancho de banda ocupado es de 13.319 MHz, centrado en 2.5 GHz, con una frecuencia límite inferior de 2.4933 GHz y una frecuencia límite superior de 2.5066 GHz, como se muestra en la figura 15.

La figura 16 muestra el espectro para un ancho de banda de 20 MHz después de pasar por el canal.

FIGURA 16. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 20 MHz.



El ancho de banda ocupado es de 17.855 MHz, centrado en 2.5 GHz, con una frecuencia límite inferior de 2.4911 GHz y una frecuencia límite superior de 2.5089 GHz, como se muestra en la figura 16.

GHz y una frecuencia límite superior de 2.5089 GHz, como se muestra en la figura 16.

De las figuras 13, 14, 15 y 16 se concluye que:

Aunque existe una pequeña variación en los anchos de banda de transmisión obtenidos a través del simulador, el canal no tiene un efecto significativo sobre el ancho de banda de transmisión ya que se logra un valor aproximado al ancho de banda teórico, pero si se tiene un efecto producido por el desvanecimientos selectivos en frecuencia mostrando el espectro de la señal mas distorsionada después de pasar por el canal. Además, se puede apreciar que el canal se encuentra centrado en la banda de 2.5 GHz especificada para LTE por el Release 8 del 3GPP.

3.3 ESCENARIO 3.

La tabla 10 muestra los parámetros del escenario 3 configurados para la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO.

TABLA 10. Parámetros para el escenario 3

Parámetro	Configuración
Modulación	QPSK
Ancho de banda	5 MHz (25 RB)
Tasa de codificación	1/3, 1/2, 2/3, 5/6
Modelo de canal	ETU70

El objetivo de este escenario es considerar los efectos de la tasa de codificación sobre el desempeño del enlace de bajada de LTE, obteniendo valores de BER, BLER y throughput.

La tabla 11 muestra la BER y el throughput para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo.

TABLA 11. Tasa de Codificación, SNR, BER Y Throughput para el escenario 3.

ETU70				
Modulación	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Tasa de codificación teórica	1/3	1/2	2/3	5/6
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	17.16	--	--	--
BER	1 E-3	--	--	--
Throughput [Mbps]	1.7	--	--	--

La tabla 12 muestra el valor de BLER más baja alcanzada

para cada una de las tasas de codificación en las cuales no se alcanzó la BLER objetivo. Además se observa la BER y el throughput para el valor de SNR dado teniendo en cuenta la BLER obtenida.

TABLA 12. Resultados para la Tasa de Codificación de 1/2, 2/3 Y 5/6 del escenario 3.

ETU70			
Modulación	QPSK	QPSK	QPSK
Tasa de codificación teórica	1/2	2/3	5/6
BLER	0.102	0.234	0.716
SNR [dB]	33	30	36
BER	511E-6	1.98E-6	0.01
Throughput [Mbps]	2.87	3.283	2902

Las figuras 17, 18 y 19 muestran el comportamiento de la BLER, BER y throughput en el canal ETU70 para las diferentes tasas de codificación, variando los valores de SNR.

FIGURA 17. BLER vs SNR para el escenario 3.

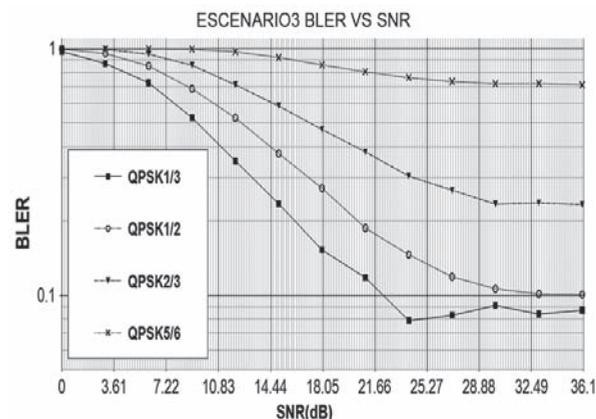


FIGURA18. BER vs SNR para el escenario 3.

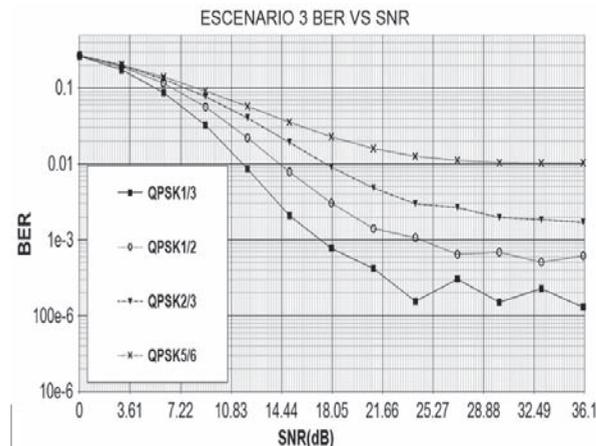
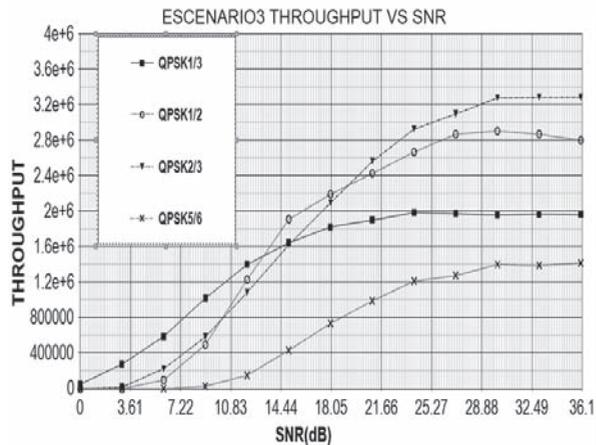


FIGURA 19. *Throughput vs SNR* para el escenario 3.

De las tablas 11 y 12 y las figuras 17, 18 y 19 se observan los siguientes resultados:

Para las tasas de codificación de 2/3 y 5/6, el valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de 0 dB a 3 dB, a diferencia de las tasas de codificación de 1/3 y 1/2 que alcanza un valor de BLER diferente al 100%. Al considerar cada una tasa de codificación, la tasa de 1/3 alcanza el valor de BLER objetivo (0.1), obteniendo valores de BER y *throughput* iguales a 1E-3 y 1.7 Mbps para una SNR de 17.16 dB. Para las tasas de codificación iguales a 1/2, 2/3 y 5/6 donde el valor de BLER objetivo (0.1) no se alcanza, se obtienen valores de BLER iguales a 0.102, 0.234, 0.716 y de BER iguales a 511E-6, 1.98E-3 y 0.01 respectivamente. En cuanto al *throughput*, al utilizar una tasa de codificación de 1/3 se obtiene un mayor valor para una SNR en el intervalo de 0 dB a 9 dB en relación a las otras tasas.

De las tablas 11,12 y las figuras 17, 18, 19 se concluye lo siguiente:

El valor de BLER y BER alcanzado cuando se considera la tasa de codificación de 5/6 se encuentra por encima del 70% y 0.01 respectivamente, por lo tanto esta tasa de codificación no es viable para las características del presente escenario. La tasa de codificación de 1/3 presenta el mejor desempeño, ya que permite lograr la BLER objetivo y presenta los valores más bajos de BER, comprobándose que a menor tasa de codificación (mayor redundancia) se obtiene un menor valor de BER.

3.4 ESCENARIO 4.

La tabla 13 muestra los parámetros del escenario 4 configurados para la evaluación y el análisis del

desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO.

TABLA 13. Parámetros para el escenario 4.

Parámetro	Configuración
Ancho de banda	10 MHz (50 RB)
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasa de codificación	1/3
Modelo de canal	EPA5

El objetivo de este escenario es considerar los efectos de los diferentes tipos de modulación sobre el desempeño del enlace de bajada de LTE, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 14 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo de 0.1 especificada por el 3GPP [11].

TABLA 14. SNR, BER Y *Throughput* para el escenario 4.

EPA5			
Modulación	QPSK	16QAM	64QAM
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	13.7	19.5	22.7
BER	8E-3	5E-3	6E-3
Throughput [Mbps]	3.35	7.75	12.33

Las figuras 20, 21 y 22 muestran el comportamiento de la BLER, BER y *throughput* para el canal multitrayecto EPA5 y modulaciones QPSK, 16QAM, 64QAM, variando los valores de SNR.

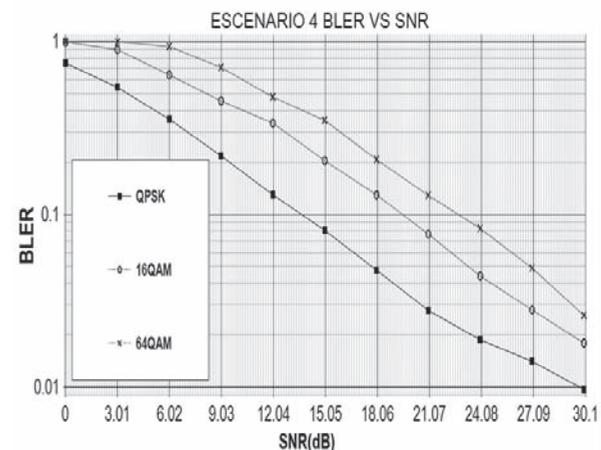
FIGURA. 20. BLER vs SNR para el escenario 4.

FIGURA 21. BER vs SNR para el escenario 4.

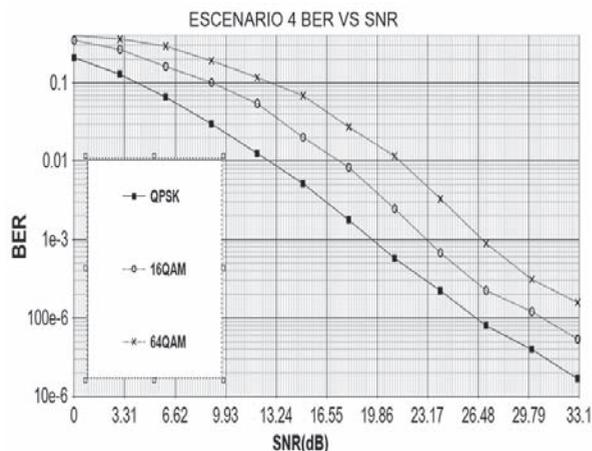
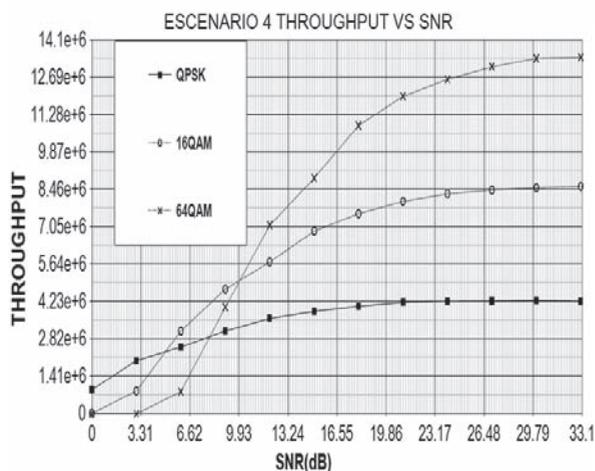


FIGURA 22. Throughput vs SNR para el escenario 4.



De la tabla 14 y las figuras 20, 21 y 22 se observan los siguientes resultados:

Al considerar los 3 tipos de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM, el valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 13.7 dB, 19.5 dB y 22.7 dB respectivamente. Los valores de BER relacionados con cada uno de estos valores de SNR son iguales a 8E-3, 5E-3 y 6E-3, y los valores de *throughput* son iguales a 3.35 Mbps, 7.75 Mbps y 12.33 Mbps, además los máximos valores de *throughput* obtenidos son iguales a 4.278 Mbps, 8.576 Mbps y 13.44 Mbps y. Por lo tanto, al considerar la modulación 64QAM los valores de BLER y BER son mayores que al considerar las modulaciones QPSK y 16QAM, obteniendo que la modulación que tiene peor desempeño en términos de BLER y BER es 64QAM y la de mejor desempeño en términos de BLER es QPSK. Además esta última alcanza el valor de BLER objetivo para un menor valor de SNR.

A continuación se muestran los diagramas de constelación para cada tipo de modulación utilizada en este escenario.

De la tabla 14 y Las figuras 23 y 24 muestran los diagramas de constelación para modulación QPSK con valores de SNR igual a 6 dB y 36 dB.

FIGURA 23. Constelación para QPSK con una SNR=6 dB.

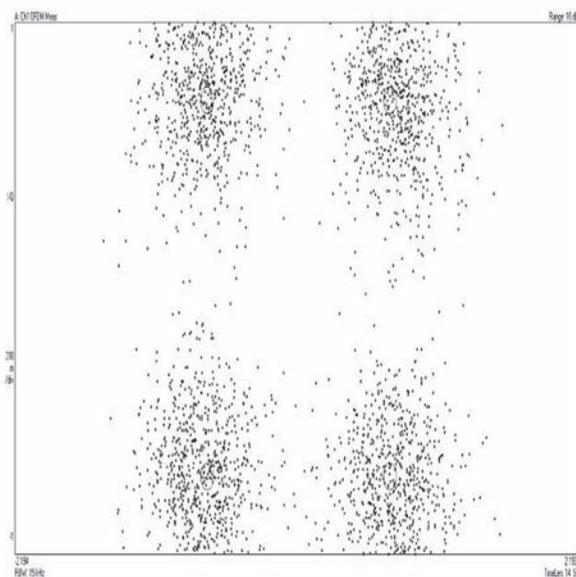
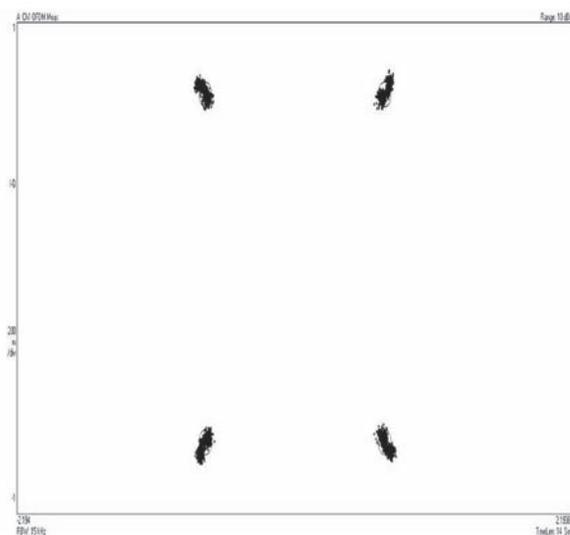


FIGURA 24. Constelación para QPSK con una SNR=36 dB.



Las figuras 25 y 26 muestran los diagramas de constelación para modulación 16QAM con valores de SNR igual a 6 dB y 36 dB.

FIGURA 25. Constelación para 16QAM con una SNR=6 dB.

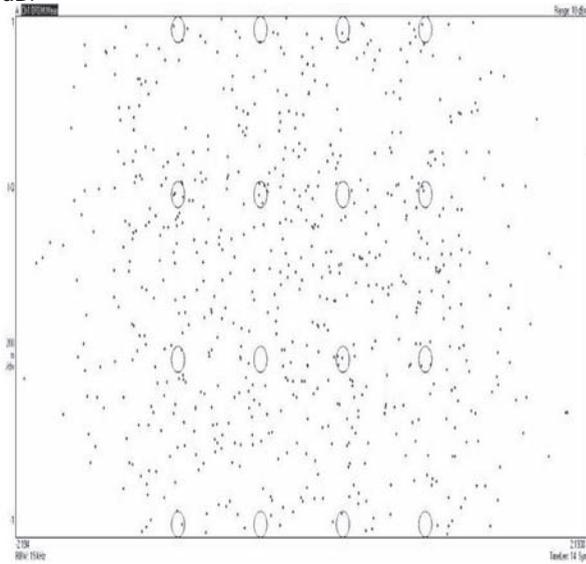
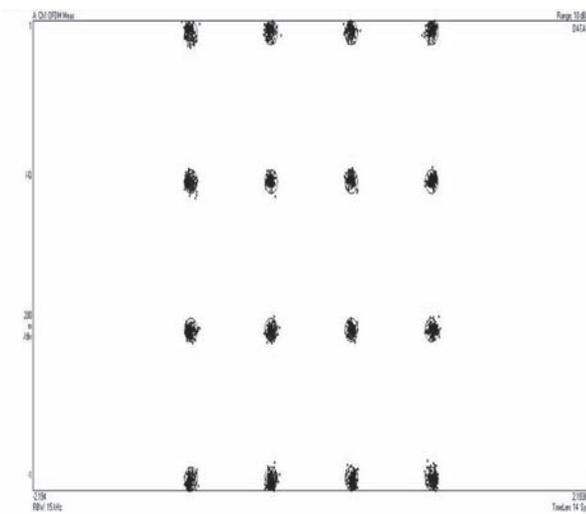


FIGURA 26. Constelación para 16QAM con una SNR=36 dB.



Las figuras 27 y 28 muestran los diagramas de constelación para modulación 64QAM con valores de SNR igual a 6 dB y 36 dB.

FIGURA 27. Constelación para 64QAM con una SNR=6 dB.

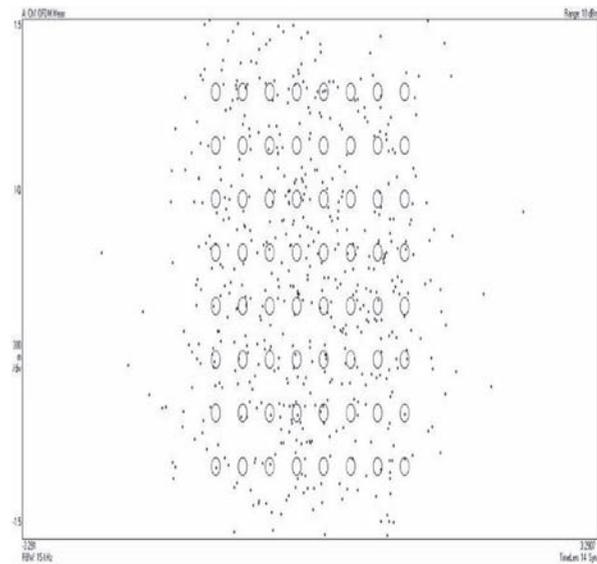
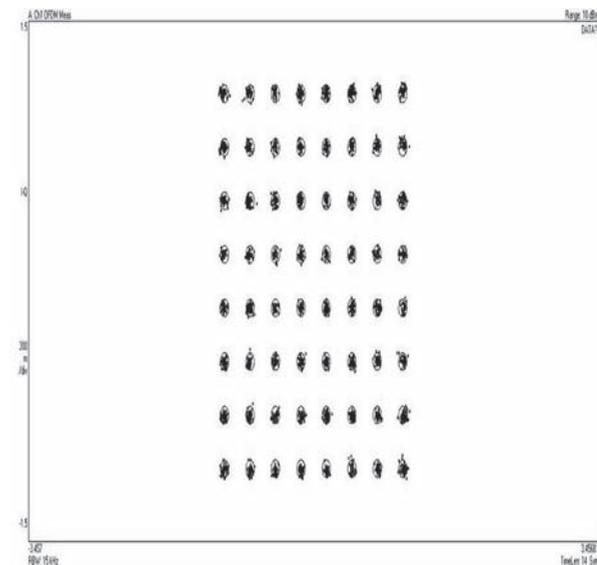


FIGURA 28. Constelación para 64QAM con una SNR=36 dB.



De las figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28 se concluye que:

Cuando se presenta una baja SNR la constelación de símbolos presenta una mayor dispersión con relación al símbolo de referencia. Sin embargo, si se aumenta la SNR la constelación se concentra dentro de cada uno de los símbolos de referencia. En escenarios con canales multitrayecto la señal modulada es afectada en amplitud y fase por el ruido, la propagación multitrayecto y el corrimiento Doppler. De igual forma, al aumentar el orden de modulación el diagrama de constelación se vuelve más complejo siendo el enlace más sensible al ruido.

4. CONCLUSIONES.

En las simulaciones a nivel de enlace se considera de manera general que existe un transmisor, un canal y receptor, y se modela el enlace para evaluar y analizar el desempeño ante diferentes condiciones de canal, estas diferentes condiciones de canal y en especial la SNR puede entenderse como una Relación Señal a Interferencia (SIR), la cual considera el efecto de la comunicación de otros usuarios en otras celdas en un sistema LTE. La variación de la SNR permite considerar el usuario en diferentes situaciones desde las más óptimas hasta las más desfavorables. Estos resultados pueden y serán tenidos en cuenta en simulaciones a nivel de sistema, como parámetros de entrada, los que permitirán analizar la interacción de los diferentes usuarios en un sistema LTE. El sistema SISO para los diferentes modelos de canal es un caso base. La variación de la SNR, y específicamente su disminución puede entenderse como un alejamiento del usuario de la estación base o un incremento de la interferencia proveniente de otros usuarios en otras celdas.

La adaptación y aplicación de una metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones [13], permitió obtener el modelo de simulación del enlace, mediante la definición de forma clara de los objetivos, fases y actividades, facilitando la implementación, evaluación y el análisis del modelo de simulación y sus resultados haciendo uso de la herramienta SystemVue®.

Al comparar los resultados de la simulación a nivel de enlace, haciendo uso de los modelos de canal AWGN y multitrayecto, se tiene que el enlace con canal AWGN presenta un mejor desempeño en términos de BLER, BER y *throughput* en función del valor de SNR. Además el enlace con modelo de canal AWGN permitió alcanzar valores de BER y BLER iguales a 0. En cuanto a los modelos de canal multitrayecto el canal con el cual

se logró mejor desempeño fue el modelo EPA5 con modulación QPSK, debido a que es el modelo de canal menos dispersivo, el cual considera una velocidad de desplazamiento promedio del UE de 2.16 Km/h para la frecuencia configurada, a diferencia de los modelos de canal EVA70, ETU70 y ETU300, los cuales consideran una velocidad de desplazamiento de 30.24 Km/h, 30.24 Km/h y 129.6 Km/h respectivamente, presentándose en ETU300 con modulación 64QAM la peor condición de propagación; obteniéndose resultados similares a los obtenidos en el enlace de subida [12]. Haciendo referencia al modelo de canal multitrayecto ETU70, con esquema de modulación QPSK y tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6, la mejor tasa de desempeño en términos de BER y BLER es la de 1/3, obteniendo un valor de BLER muy por debajo de la BLER objetivo, lo cual implica que una mayor tasa de codificación afecta el desempeño del sistema en un enlace con modelo de canal multitrayecto, debido a la disminución de bits de redundancia y a la dispersión que genera el canal en frecuencia y tiempo.

5. REFERENCIAS.

- [1] Cordoba, F., & Zúñiga, J. (2012). *Análisis de Desempeño al Nivel Físico del Enlace de Bajada de LTE*. Tesis de trabajo de pregrado no publicada. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- [2] Agusti, R., Álvarez, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Perez, J., & Sallent, O. (2010) *LTE: Nuevas Tendencias en Telecomunicaciones Móviles*. España: Fundación Vodafone.
- [3] Holma, H., & Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Inglaterra: Wiley.
- [4] [Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. United Kingdom: Elsevier.
- [5] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2009) *LTE, the UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice*. United Kingdom: Wiley.
- [6] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. (2010). *"Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Physical Channels and Modulation" (Release 8)*. Recuperado (2012, Julio 2) de http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36211-890.zip.

- [7] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. (2010). "Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Multiplexing and Channel Coding". Recuperado (2012, Julio 2) de http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36212-880.zip.
- [8] FURHT, B. (2009). *Long Term Evolution 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*. EEUU: CRC.
- [9] Khan, F. (2009). *LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance*. New York: Cambridge.
- [10] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. (2010). "Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Base Station (BS) conformance testing" (Release 8). Recuperado (2012, Agosto 6) de http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36141-890.zip.
- [11] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. (2010). "Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): User Equipment (UE) radio transmission and reception." (Release 8). Recuperado (2012, Agosto 6) de http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36101-860.zip.
- [12] Martínez, J., & Covalada, J. (2012). *Análisis de Desempeño al Nivel Físico del Enlace de Subida de LTE*. Tesis de trabajo de pregrado no publicada. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- [13] Muñoz, C., & Muñoz, J. (1995). *Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones*. Tesis de trabajo de pregrado no publicado. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.