

Análisis de la simulación del canal físico compartido del enlace descendente de LTE con MATLAB

Simulation analysis of the physical downlink shared channel with MATLAB

Ing. Mey-Ling Wong Pérez^{1*}, Ing. Orlando Fundora Carrasco², Ing. José Antonio Zanabria Quinteiro³, Ing. Ailyn Estévez Hidalgo⁴

Recibido: 11/2017 | Aceptado: 02/2018

PALABRAS CLAVE

LTE
Throughput
MIMO
PDSCH
Modelos de Propagación

RESUMEN

El desarrollo vertiginoso de las comunicaciones móviles, promovido por la creciente demanda de tráfico, impulsa el despliegue de redes con mejores prestaciones. Esta investigación se orientó al análisis de la transmisión y recepción de los flujos de datos a nivel de enlace en LTE, estándar para comunicaciones inalámbricas como concepto de arquitectura evolutiva hacia la 4ta generación. En este análisis fue empleado el LTE System Toolbox™ de MATLAB R2018a como herramienta de simulación para modelar el esquema de transmisión de la capa física y medir el throughput del canal físico compartido del enlace descendente (PDSCH); variando el esquema de transmisión utilizado en función de los modelos de propagación definidos por 3GPP. Se obtuvo para los diferentes canales de referencia definidos para el PDSCH, los valores de SNR mínimos requeridos para superar el % de umbral del throughput establecido para una transmisión óptima. Además, se validó las capacidades de las técnicas MIMO trama por trama. De esta forma se analizan los parámetros de desempeño de los sistemas LTE.

KEYWORDS

LTE
Throughput
MIMO
PDSCH
Propagation models

ABSTRACT

The vertiginous development of mobile communications, promoted by the growing traffic demand, drives the deployment of networks with better benefits. This research was oriented to the analysis of the transmission and reception of the data flows at the link level in LTE, standard for wireless communications as a concept of evolutionary architecture towards the 4th generation. In this analysis, the LTE System Toolbox™ of MATLAB R2018a was used as a simulation tool to model the transmission scheme of the physical layer and measure the Throughput of the physical downlink shared channel (PDSCH); varying the transmission scheme used based on the propagation models defined by 3GPP. It was obtained for the different reference channels defined for the PDSCH, the minimum SNR values required to exceed the % threshold of the Throughput established for optimal transmission. In addition, the capabilities of MIMO frame-by-frame techniques were validated. By this way the performance parameters of the LTE systems are analyzed.

1* Especialista en Telemática, ETECSA, Mayabeque, Cuba, mey-ling.wong@etecsa.cu

2 Especialista en Ciencias Informáticas, Delegación ICRT, Mayabeque, Cuba, orlando.fundora@dmayabeque.icrt.cu

3 Especialista en Telemática, ETECSA, Mayabeque, Cuba, jose.zanabria@etecsa.cu

4 Especialista en Telemática, ETECSA, Mayabeque, Cuba, aestevezele@cujae.edu.cu

Introducción

Las comunicaciones inalámbricas han evolucionado desde los sistemas desarrollados por el Proyecto de Asociación para la Tercera Generación 2 (3GPP2) hasta los estándares desplegados por la (3GPP), la cuarta generación (4G) con LTE-Advanced, es el sistema más novedoso implementado en la actualidad; quedando mucho estudio aún por desarrollar en los sistemas Evolución a largo Plazo (LTE) para poder explotar todas sus funcionalidades. En Cuba, la Empresa de Telecomunicaciones, ETECSA, está dando los primeros pasos a la migración a la 4G en las principales zonas de interés turístico. Por lo que resulta significativo realizar simulaciones del estándar LTE y obtener como resultado valores de referencia en los parámetros que determinan la calidad de servicio que permitan evaluar el desempeño en el entorno de interés para su futuro despliegue.

LTE es un estándar de la norma 3GPP como fruto de la evolución del Sistema Universal de la Tecnología Móvil (UMTS) en el cual se especifica una nueva interfaz de aire para evitar los desvanecimientos multitrayecto, empleando la multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM). El estándar tiene un ancho de banda flexible y soporta las transmisiones de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Para separar el canal ascendente del descendente se usa principalmente la transmisión dúplex por división en frecuencias (FDD), aunque también se encuentra disponible en transmisión dúplex por división en el tiempo (TDD). El estándar está basado totalmente en el protocolo de transmisión IP. En el despliegue de la red pueden ser utilizados los nodos Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM) y UMTS existentes con el objetivo de reducir los costos de montaje y mantenimiento de la red (TSTC, 2016).

El departamento de Comunicaciones Inalámbricas de la Cujae (Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”), ha desempeñado un profundo estudio del estándar LTE como la “Aproximación a la simulación de la capa física del estándar LTE”, “Análisis de las prestaciones de los sistemas LTE y LTE-Advanced a partir de procesos de simulación”, entre otros, empleando para ello el Simulink y LTE Downlink Link Level Simulator, respectivamente, los cuales presentan colaboración de MatLab. El uso de estas herramientas ha ofrecido buenos resultados en la medición de la calidad de servicio

y el *throughput*. En este sentido, múltiples grupos de investigación se han dedicado al desarrollo de simuladores con la capacidad de emular el comportamiento de dicho sistema. Ejemplo de ello son los simuladores ATOLL y Simu-LTE desarrollados por Forsk y OMNet++ respectivamente (González, 2015). En este estudio se propone medir el desempeño de LTE basándose en el *toolbox* y las Apps de MatLab que por su gran fiabilidad y alcance pueden evaluar todas las prestaciones del sistema.

El objeto de estudio de este trabajo es la transmisión del PDSCH bajo los modelos de propagación definidos por la 3GPP para la 4G de las comunicaciones inalámbricas y los esquemas de modulación que mejor se acoplan a cada escenario. En esta investigación se va a analizar el comportamiento de uno de los parámetros más importantes cuando se evalúa la calidad de transmisión de una señal, el *throughput* definido como el número de bits por segundo que en la práctica es posible obtener a través de un enlace de comunicación, refiriéndose a la fracción del ancho de banda que está siendo aprovechada para transmitir la información de usuario, dando una medida del rendimiento del sistema.

Materiales y métodos

En esta investigación se realiza una serie de simulaciones empleando el software MatLab R2018a, el cual proporciona el LTE System Toolbox™ con funciones implementadas para el modelado de la capa física a nivel de sistema generando ondas de enlace ascendente y descendente hasta el nivel de canales físicos, realizando la codificación CRC, turbo códigos, etc. Estas funciones, con la interfaz simple y la facilidad de parametrización, ayudan a crear modelos con mayor acceso a datos intermedios según sea necesario y a generar una gran cantidad de formas de onda o vectores de prueba (MathWorks, 2018).

El análisis de las funcionalidades del sistema LTE fue llevado a cabo a partir del estudio de su capa física y el procesamiento que se realiza para transmitir los flujos de datos. A continuación, se describe el tipo de trama escogido, el diagrama en bloques de modulación y codificación para la transmisión del PDSCH, los modos de transmisión y los modos de propagación a utilizar.

Estructura de trama

Las transmisiones de enlace descendente y enlace ascendente se organizan en tramas de radio. Están

definidos para LTE tres estructuras de tramas: tipo 1, tipo 2 y tipo 3 con una duración de 10 ms cada una. El modelo de trama a emplear es el tipo 1 que se aplica solo para el modo de transmisión FDD. Cada trama de 10 ms consta de 20 slots, numerados de 0 a 19, cada subtrama es definida por dos slots consecutivos como muestra la figura 1.

Cada slot está conformado por una cantidad de símbolos OFDM en dependencia del prefijo cíclico a utilizar (Tabla 1). Cada símbolo se transmite en 12 subportadoras de 15 KHz, conformando un bloque de recurso por slot, los bloques de recurso están conformados por los elementos de recurso, que es la unidad de frecuencia de tiempo más pequeña para la transmisión del enlace descendente. A continuación, se le añade una cabecera para asignar cada símbolo individual a cada usuario. La cantidad de bloques de

recursos a transmitir depende del ancho de banda utilizado (3GPP, 2016).

El número de bits por símbolo dependerá de la codificación escogida y esta, a su vez, de las condiciones del entorno. Si las condiciones de radio son ideales se empleará 64-QAM y se enviarán 6 bits por símbolo. En peores condiciones de entorno emplearemos 16-QAM (4 bits por símbolo) o QPSK (2 bits por símbolo).

Procesamiento DL-SCH / PDSCH

El canal compartido del enlace descendente DL-SCH es un canal de transporte utilizado para la transmisión de datos de usuario, el control dedicado, información de la capa superior específica de usuario e información del sistema de enlace descendente. El proceso de codificación incluye las siguientes etapas, formando la palabra de código para la transmisión en el PDSCH (3GPP, 2009). (Figura 2)

Configuración		Subportadoras	Símbolos OFDM
Prefijo Cíclico Normal	$\Delta f = 15$ kHz	12	7
Prefijo Cíclico Extendido	$\Delta f = 15$ kHz		6
	$\Delta f = 15$ kHz	24	3

Tabla 1. Parámetros de bloques de recurso físico.

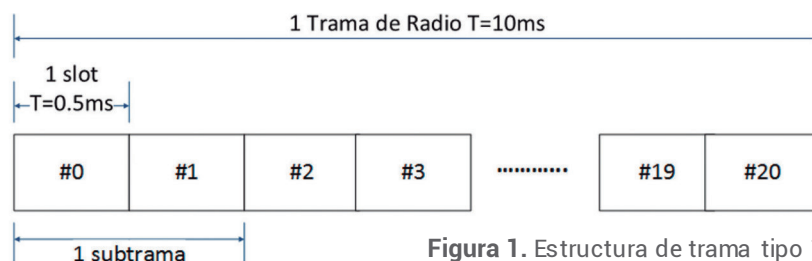


Figura 1. Estructura de trama tipo 1.

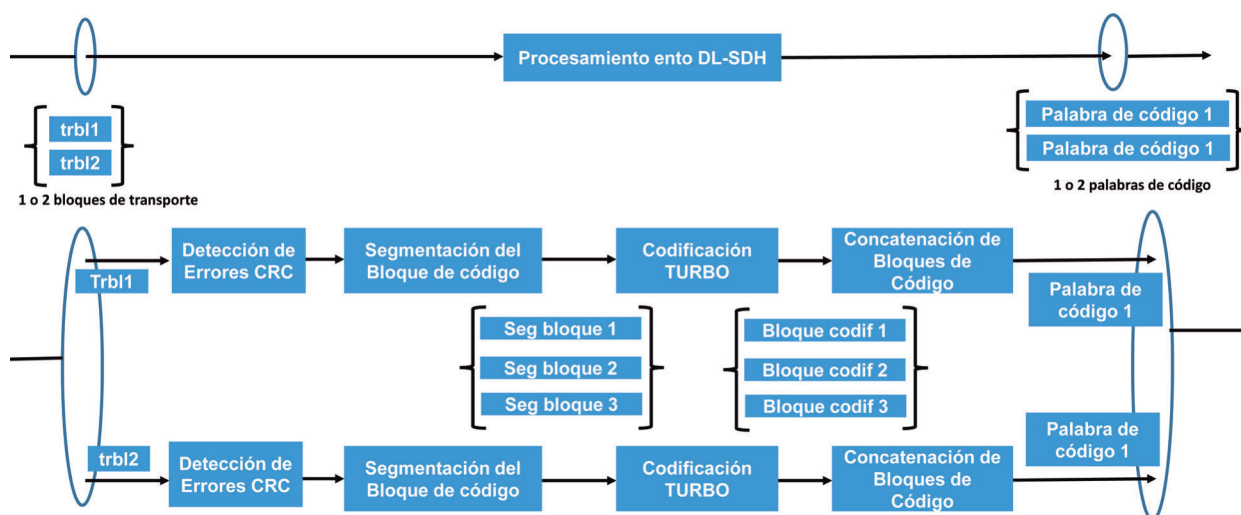


Figura 2. Procesamiento DL-SCH.

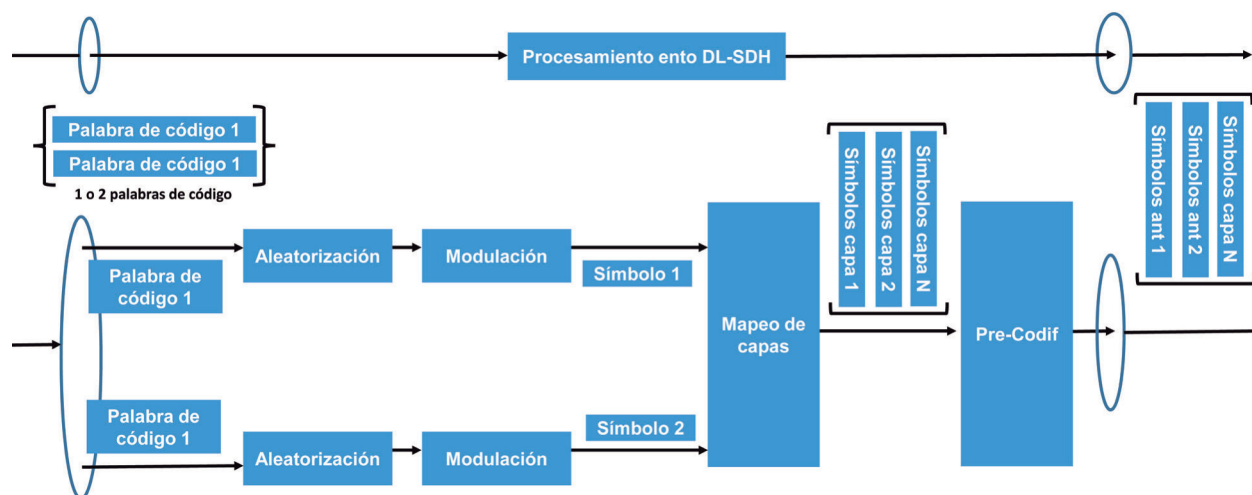


Figura 3. Procesamiento PDSCH.

El PDSCH es el canal físico que transporta los datos codificados del DL-SCH. El procesamiento del canal PDSCH incluye las siguientes etapas, (Figura 3). Después de la aleatorización de los bits de cada palabra y código, se escoge la modulación QPSK, 16QAM, 64QAM o 256QAM, los datos complejos modulados son mapeados por capas de acuerdo a la técnica MIMO seleccionada, se transmitirán tantas capas como arreglos de antenas en la transmisión del canal físico.

La etapa de pre-codificación toma la matriz M por capas de la etapa de mapeo de capas y devuelve la matriz de tamaño $M \times P$ para la transmisión en P antenas. Los símbolos complejos modulados se asignan a los elementos de recurso y se conforma el bloque de recurso (RB) a transmitir (3GPP, 2009).

Modos de transmisión

La técnica de transmisión de múltiples antenas MIMO incrementa la robustez de la señal, la capacidad del sistema y la tasa de usuarios. En los sistemas LTE han sido definidos 7 modos MIMO para el enlace descendente como se muestra en la tabla 2. (González, 2015)

Modelos de propagación de canal

Para simular las condiciones de propagación se ha implementado un conjunto de tres modelos de canal los cuales estiman el rendimiento en diferentes condiciones, modelado como una estructura mediante etapas de retardo como se muestra en la Tabla 3, definidos para una baja, media y alta frecuencia Doppler como refiere la tabla 4 (3GPP, 2011). Los modelos de canal de propagación analizados son: EPA –Modelo A Peatón Extendido– es-

Modo	MIMO
1	SISO o SIMO. Port0
2	Diversidad de transmisión. TxD
3	Multiplexación Espacial de Lazo Abierto. OL-SM
4	Multiplexación Espacial de Lazo Cerrado CL-SM
5	Usuario Múltiple-MIMO
6	Lazo Cerrado Rango 1
7	Port5

Tabla 2. Modos MIMO.

pecificado para los usuarios que están en condición estacionaria o ligeramente en movimiento, EVA –Modelo A Vehicular Extendido– describe mayor velocidad en la movilidad del usuario y el ETU –Modelo Típico Urbano Extendido– asumido en condiciones con mayores retardos (Kaushik, 2016).

Para realizar las simulaciones empleamos los canales de referencia que están definidos en el Anexo A.3.3 de la Especificación Técnica (TS) 36.101 (3GPP, 2011) definida por el 3GPP, que declara la Medición de los Canales de Referencia (RMC) para pruebas de rendimiento del equipo de usuario (UE). Cada configuración especifica el tipo de trama, la modulación y el modo dúplex que se emplea.

En este estudio se generan valores aleatorios para así conformar las tramas, utilizando el esquema DL-SCH y PDSCH de las figuras 2 y 3, respectivamente. Las principales funciones de LTE System Toolbox™ para programar la secuencia de transmisión

EPA		EVA		ETU	
Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]	Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]	Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]
0	0.0	0	0.0	0	-1.0
30	-1.0	30	-1.5	50	-1.0
70	-2.0	150	-1.4	120	-1.0
90	-3.0	310	-3.6	200	0.0
110	-8.0	370	-0.6	230	0.0
190	-17.2	710	-9.1	500	0.0
410	-20.8	1090	-7.0	1600	-3.0
-	-	1730	-12.0	2300	-5.0
-	-	2510	-16.9	5000	-7.0

Tabla 3. Modelos de Propagación de canal en LTE.

Modelo de Canal	Frecuencia Doppler Máxima
EPA 5Hz	5 Hz
EVA 5Hz	5 Hz
EVA 70Hz	70 Hz
ETU 70Hz	70 Hz
ETU 300Hz	300 Hz

Tabla 4. Parámetros para los modelos de canal LTE.

son: `lteRMCDLTool`, `lteOFDMDemodulate`, `ltePDSCHDecode`, `lteDLSCHDecode` (MathWorks, 2018). Las condiciones de propagación de desvanecimiento multirayecto se refieren a los descritos en la tabla 3.

Para realizar el análisis del *throughput* en porcentaje de la transmisión de la forma de onda del PDSCH y su comportamiento por trama se utiliza el *LTE Throughput Analyzer*, que se encuentra disponible en las APPs de MatLab.

Resultados y discusión

Medición del *throughput* del PDSCH en modo FDD. En un primer análisis se escoge un perfil de

retardo de EPA, con el que se obtiene que la respuesta del canal cambie lentamente sobre la frecuencia, utilizando para ello una frecuencia Doppler de 5 Hz, definido en la tabla 4, lo que hace que el canal se desvanezca muy lentamente con el tiempo. En la tabla 5 se describen los modelos a simular, en las figuras 4, 5 y 6 se muestra el comportamiento del *throughput* en kbps obtenido en cada caso.

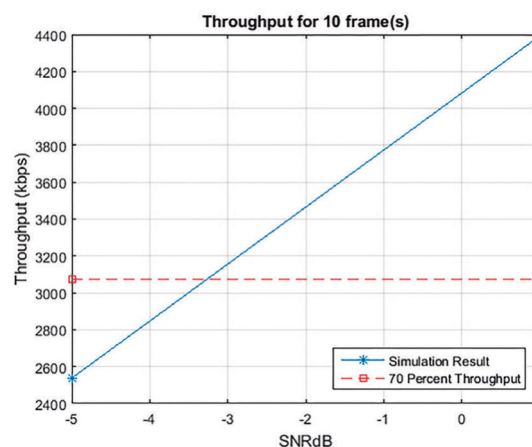


Figura 4. Throughput (Kbps) vs SNR (dB) de R.2 para EPA5.

Canal de Referencia	Esquema de transmisión	Modulación	Ancho de banda	Modelo de Propagación	Correlación entre antenas
R.2 FDD	Port0	QPSK	10 MHz	EPA5	1x2 Baja
R.12 FDD	TxD	QPSK	1,4MHz	EPA5	4x2 Media
R.10 FDD	CLSM	QPSK	10 MHz	EPA5	2x2 Alta

Tabla 5. Parámetros definidos para el análisis de propagación del Modelo EPA.

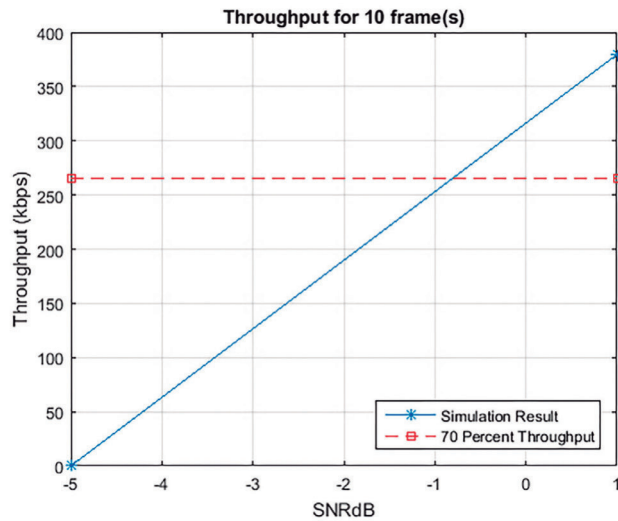


Figura 5. Throughput (Kbps) vs SNR (dB) de R.12 para EPA5.

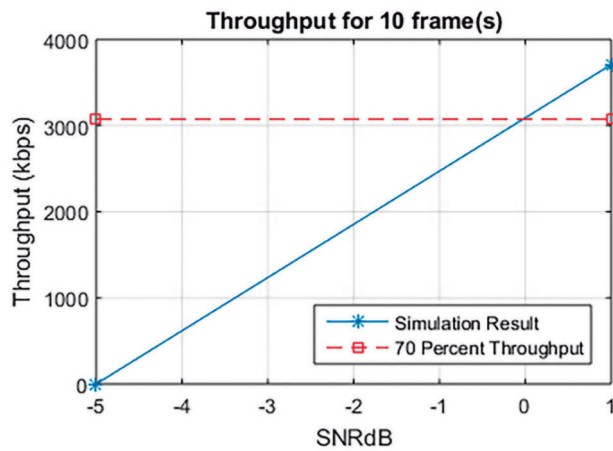


Figura 6. Throughput (Kbps) vs SNR (dB) de R.10 para EPA5.

En los gráficos anteriores se observa que independiente del esquema de transmisión empleado para un modo de propagación EPA5, se obtienen resultados del *throughput* por encima de 70% de referencia (3GPP, 2011), con una relación señal a ruido (SNR) baja, usando una modulación robusta como lo es QPSK. Todo esto determina un *throughput* en el orden de los Mbps para R.2 y R.10 y para R.12 en Kbps es el ancho de banda del canal utilizado.

El análisis del *throughput* en porciento de la transmisión de la forma de onda del PDSCH y su comportamiento por trama para R.2, R.12 y R.10 se observa en las figuras 7, 8 y 9, respectivamente.

En el análisis del PDSCH estimado trama por trama, se observa un mejor *throughput* por trama en el canal de

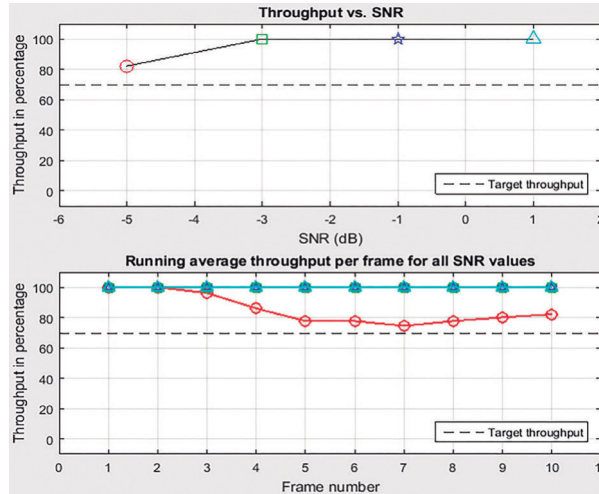


Figura 7. Throughput (%) vs SNR (DB) de R.2 para EPA5 y su comportamiento por tramas.

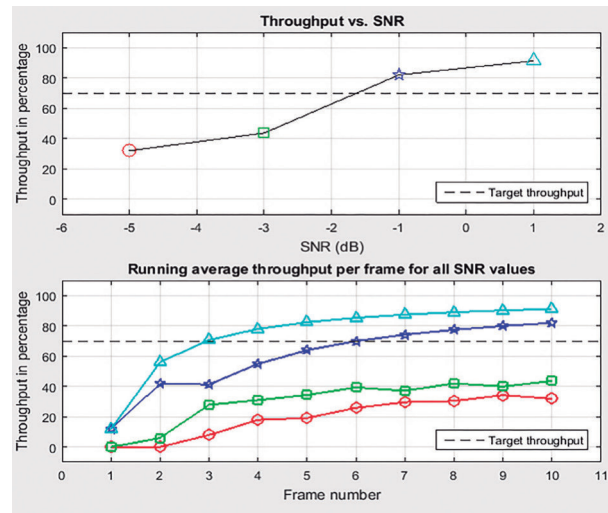


Figura 8. Throughput (%) vs SNR (DB) de R.12 para EPA5 y su comportamiento por tramas.

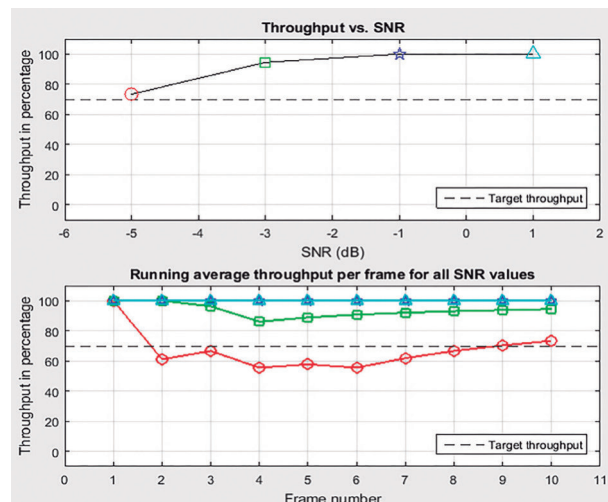


Figura 9. Throughput (%) vs SNR (DB) de R.10 para EPA5 y su comportamiento por tramas.

referencia R.10 que emplea la multiplexación espacial comparado con la diversidad de transmisión, aun teniendo un menor número de antenas en su arreglo. Como se evidencia en las gráficas anteriores, a partir de un valor determinado de SNR el comportamiento del *throughput* comienza a mantenerse en su valor óptimo permitido según las técnicas de transmisión empleadas.

Obtención de valores de SNR óptimos para superar el umbral del *throughput*

En estas simulaciones se seleccionan los canales de referencia R.0, R.1, R.2, R.4, R.9, R.10, R.11, R.12 y R.14 para un modo de transmisión dúplex FDD, se transmiten 5 tramas en todos los casos variando el esquema de transmisión y el modelo de propagación. Primeramente, se analizan los canales de referencia de la tabla 6 para las simulaciones de una sola antena con transmisión Port0 (1x2). Los valores de SNR mínimo obtenidos por modelo de propagación, para una correlación MIMO baja y media entre las antenas de trans-

misión y recepción para superar el umbral del *throughput* establecido, se muestra en la Tabla 7.

Los resultados de simulación muestran la SNR requerida para superar el umbral de *throughput* y establece los valores de referencia para obtener una transmisión óptima en dependencia de las condiciones del canal para la implementación de una red LTE. A medida que se emplea una modulación menos robusta aumenta la SNR requerida para ofrecer una buena calidad de servicio. Analizando los resultados de acuerdo a los entornos de propagación EPA, EVA y ETU con perfiles de retardo bajo, medio y alto respectivamente, la SNR obtenida es mayor mientras aumenta el retardo en el canal y se obtienen mejores resultados de simulación para la correlación de antena baja.

Al comparar los modelos de propagación manteniendo la misma técnica MIMO para todos los RCM, para ETU300 y ETU70, que experimentan un mayor retardo, se requiere una mayor SNR para lograr superar el % de umbral que está establecido para EPA5 en los canales R.0, R.1, R.7 y R.9 debido a sus modulaciones

Parámetros definidos				Parámetros de Referencia	
RCM	Modulación	Ancho de banda (MHz)	No. RB	% Throughput	Throughput Max (Mbps)
R.2	QPSK	10	50	70	3.953
R.4	QPSK	1.4	6	70	0.342
R.0	16QAM	3	1	30	0.202
R.1	16QAM	10	1	30	0.230
R.7	64QAM	10	50	70	27.294
R.9	64QAM	20	100	70	55.498

Tabla 6. RCM con transmisión Port0 (1x2).

RCM	SNR [dB]									
	EPA5		EVA5		EVA70		ETU70		ETU300	
	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media
R.2	-5,2	-2,6	-2,8	-2,6	-3,1	-2,4	-3,5	-2,7	-3,4	-2,8
R.4	-3,5	-0,9	-2,6	-1,6	-1,5	-1	-2,5	-1,7	-3,5	-2,9
R.0	-2,0	1,7	-2,6	-1,2	-0,3	-0,6	1	0,8	0,7	0,7
R.1	-2,0	3,5	1,2	7,9	3,5	6,4	2,3	3,3	0,1	0,6
R.7	12,3	15	15,2	16,6	15,2	16,5	15	16,1	16	18,8
R.9	12,3	14,9	14,1	15,9	14,8	16,1	15,4	16,6	16,1	18,5

Tabla 7. SNR [dB] mínima obtenida para los RCM por modelo de propagación.

menos robustas; pues para los canales con modulación QPSK la variación de SNR es mínima en los tres modelos. A medida que aumenta el retardo en el canal de propagación para una misma correlación entre antenas, mayor será la SNR requerida para la transmisión de los datos. La variación de la correlación entre el arreglo de antenas es determinante pues se obtienen mejores resultados del *throughput* en modelos de propagación con mayores retardos con correlación baja que para modelos con menores retardos con correlación media. Los resultados obtenidos con correlación alta son similares a los de correlación media.

En segunda instancia se analizan los canales de referencia que se reflejan en la tabla 8 para las simulaciones Multi-Antena variando el esquema de transmisión. En esta simulación se realiza un análisis del comportamiento del *throughput* de un enlace para diferentes tipos de canal.

Como se refleja en los resultados de la tabla 9, para todos los modos de transmisión el sistema muestra un mejor comportamiento con una correlación baja entre las antenas, pues consigue estabilizar su valor de *throughput* desde un valor de SNR inferior al requerido con una correlación media. Se observa que para

lograr mayores tasas de transmisión está asociado en cada caso a requerimientos cada vez mayores de SNR.

Al comparar los modelos de propagación, para los RCM que se describen en la Tabla 8 y emplear técnicas de modulaciones más complejas se logra mantener la SNR requerida aún aumentando los retardos en el canal de propagación. Se mantienen los mejores resultados en la transmisión para una correlación baja entre las antenas.

Conclusiones

En esta investigación se describe el esquema de transmisión a nivel de capa física del sistema LTE usando las especificaciones de los Release del 3GPP. Este modo de procesamiento de los flujos de datos es el que le proporciona su alta capacidad, velocidad y calidad en el servicio. El estudio de las funcionalidades de LTE basado en los RCM es muy útil pues permite evaluar el rendimiento y calidad del sistema con modelos de parámetros configurados.

Disponer de más ancho de banda en la celda implica que será percibido un mayor *throughput* por el usuario. Sin embargo, este incremento es limitado por la insuficiente disponibilidad del espectro radioeléctrico en las

Parámetros definidos					Parámetros de Referencia	
RCM	Modulación	Ancho de banda	No. RB	Esquema de Transmisión	% Throughput	Throughput Max (Mbps)
R10	QPSK	10	50	TxDiversity 2x2	70	3,953
R10	QPSK	10	50	Saptialmux 2x2	70	3,953
R12	QPSK	1,4	6	TxDiversity 4x2	70	0,342
R11	16QAM	10	50	Saptialmux 2x2	70	11,664
R14	16QAM	10	50	Saptialmux 4x2	70	11,513

Tabla 8. Canales de Referencia con variación de esquema de transmisión.

RCM	SNR [dB]									
	EPA5		EVA5		EVA70		ETU70		ETU300	
	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media
R10	-2,9	-1,5	-1,3	-0,9	-2,8	-2,4	-3,1	-2,8	-3,3	-2,7
R10	-3,3	-4,4	-1,6	-3,5	-2,4	-2,7	-2,5	-3,6	-3,1	-4
R12	-2,3	-0,1	-2,1	-0,3	-2,2	-1,6	-2	-1,7	-3,4	-2,5
R11	11,9	16	13,7	20,3	12,8	19,3	11	19,4	11	19
R14	12	18	13,9	22,1	12	21,9	11,7	19,9	12,9	23,9

Tabla 9. SNR [dB] mínima obtenida para los Canales de Referencia por modelo de propagación.

bandas de 800 MHz a 3.5 GHz, en la cual operan muchos servicios. Por lo que para obtener mejores valores de *throughput* hay que aprovechar las características del medio y emplear modulaciones menos robustas con técnicas de transmisión de mayor complejidad cuando la calidad de la señal es óptima y modulaciones robustas cuando los valores de SNR son bajos.

Se obtienen los valores de SNR mínimos que se requieren considerando retardos bajos, medios y altos del canal de propagación, dando la medida de la potencia de la señal que se necesita proporcionar en cada entorno para lograr el *throughput* deseado.

Las técnicas MIMO tienden a mejorar el *throughput*, en las simulaciones realizadas, se pudo corroborar con las técnicas empleadas: Port0, Diversidad de Transmisión y Multiplexación Espacial que todas pueden alcanzar la capacidad de transmisión deseada, pero

la que ofrece mayor calidad de transmisión por trama es la Multiplexación Espacial.

Se demuestra la potencialidad de LTE System Toolbox y la plataforma MATLAB para posibilitar la creación de un entorno potente para la verificación y prueba a gran escala del sistema, que permite realizar test a sus funcionalidades previo a su despliegue.

Resulta de vital importancia continuar el estudio del estándar LTE, siendo el punto de partida para LTE-Advanced y la siguiente generación. Partiendo de esta investigación se puede analizar el *throughput* y la SNR requerida para el modo de transmisión TDD y extender las pruebas hasta una capacidad de transmisión de 1Gbps, LTE-Advanced. Además, realizar las simulaciones del Canal de Medida de Referencia (CSI), así como la medición de la magnitud del vector error (EVM).

Referencias

- González López, G; Prado Álvarez, D (2015). Análisis de los sistemas de LTE y LTE-Advanced a partir de procesos de simulación. Tesis de pregrado. Facultad de Telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba.
- Kaushik, A; Khurana, S; Sangeeta (2016). *FDD Based Throughput Simulation of EPA-EVA Model for LTE downlink channel*. [versión electrónica]. *Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 03(10). Disponible en <https://www.irjet.net/archives/V3/i10/IRJET-V3I10157.pdf>
- MathWorks (2018). LTE System Toolbox™ User's Guide. Consultado 2 de marzo, 2018. Disponible en http://es.mathworks.com/help/pdf_doc/lte/lte_ug.pdf.
- TSTC (2016). Tutorial de la Capa Física en Comunicaciones Móviles. Consultado 4 de junio, 2018. Disponible en <http://ceres.ugr.es/~alumnos/tutorialcfcm/cuatro.html>
- 3GPP (2009). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding. Release 8 TS 36.212 V8.8.0. Disponible en https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/08.08.00/ts_136212v080800p.pdf
- 3GPP (2011) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. Release 10 TS 36.101 V10.3.0. Disponible en https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/10.03.00_60/ts_136101v100300p.pdf
- 3GPP (2016). *3rd Generation Partnership Project*; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. Release 13 TS 36.211 V13.2.0. Disponible en <https://www.3gpp.org/ftp/standards/3GPP/TS36211/13/36211-13.pdf>

