

Rendimiento de la técnica de acceso múltiple no ortogonal en un sistema de comunicación móvil Long-Term Evolution

Non-orthogonal multiple access technique performance in a Long-Term Evolution mobile communication system

Néstor Estrada Brito ^{1, 2}, Cristian Morales Alarcón ^{2*}

¹Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 46022; nestor.estrada@unach.edu.ec

²Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 060108

* Correspondencia: cmorales@unach.edu.ec

Recibido 27 febrero 2020; Aceptado 27 abril 2020; Publicado 01 junio 2020

Resumen: La creciente demanda de datos a través de las redes móviles y la búsqueda de servicios más eficientes por parte de los usuarios han inducido a la generación de nuevas técnicas que incrementen la eficiencia espectral. El acceso múltiple no-ortogonal (NOMA) es una de las técnicas que están siendo evaluadas dentro del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), esta proporciona servicios a múltiples usuarios mediante multiplexación en potencia. Esta investigación evalúa el rendimiento de NOMA en sistemas LTE (*Long Term Evolution*) mediante simulaciones de capa física, en relación con las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM (*Time Division Multiplexing*) y FDM (*Frequency Division Multiplexing*). Se compararán, además, las ganancias obtenidas, con las publicadas en la bibliografía de *Advanced Television Systems Committee* (ATSC) 3.0. Los resultados demuestran que NOMA es mejor que TDM en los casos que se utilice una tasa baja en el receptor móvil y una tasa media en el receptor fijo, demostrando ganancias de 3.35dB y 0.25dB, respectivamente.

Palabras clave: ATSC 3.0, eficiencia espectral, LDM, LTE, NOMA.

Abstract: *The growing demand for data through mobile networks and the search for more efficient services by users have led to new techniques that increase spectral efficiency. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is one of the techniques being evaluated within the 3GPP (Third Generation Partnership Project). It provides services to multiple users through potential multiplexing. This research evaluates the performance of NOMA in LTE (Long Term Evolution) systems through physical layer simulations in relation to conventional orthogonal multiple access technologies TDM (Time Division Multiplexing) and FDM (Frequency Division Multiplexing). The profits obtained will be compared with those published in the Advanced Television Systems Committee (ATSC) 3.0 bibliography. The results show that NOMA is better than TDM when a low rate is used in the mobile receiver. An average rate in the fixed receiver showed gains of 3.35dB and 0.25dB, respectively.*

Keywords: ATSC 3.0, LDM, LTE, NOMA, spectral efficiency.

1 Introducción

El proceso evolutivo de las redes móviles ha provocado altas demandas por parte de los usuarios, los cuales buscan servicios más eficientes con altas velocidades de transmisión de información. Sin embargo, el número de usuarios y los servicios requeridos aumentan constantemente, lo que ha estimulado un mayor desarrollo de tecnologías que cumplan con dichos requerimientos. Es por ello que desde 1980 se han lanzado varias generaciones de redes móviles desde la 1G, tecnología móvil analógica la cual permitía la transmisión de voz, pero no de datos, hasta hoy en día la red de quinta generación o 5G, que se encuentra en despliegue, orientada a la integración del internet de las cosas y el ancho de banda.

Ahora bien, la adopción de una nueva generación de red móvil, la cual incluye nuevas tecnologías, involucra el desarrollo de investigaciones que incorporen técnicas que satisfagan las exigencias de los usuarios, con la finalidad de garantizar la eficiencia de todo tipo de servicios, desde la televisión digital hasta videoconferencias.

NOMA es una técnica de Acceso Múltiple No-Ortogonal, también conocida como multiplexación por división de capas (LDM), que ha sido propuesta recientemente como una tecnología prometedora para la próxima generación de televisión digital terrestre (TDT), la cual proporciona una transmisión simultánea de servicios fijos y móviles en el mismo canal de radiofrecuencia (Wu, Rong, Salehian, & Gagnon, 2012; Montalban *et al.*, 2014). Existen dos variantes de NOMA, la convencional para tecnología 4G y su variante MUST (*Multiuser Superposition Transmission*) para 5G que permite multiplexar múltiples usuarios. Para transmitir las señales multicapa para la eficiencia del espectro, NOMA utiliza el 100% del ancho de banda de radio frecuencia (RF) y el 100% de los recursos de tiempo en comparación con las técnicas de acceso múltiple ortogonal convencionales *Time Division Multiplexing* (TDM) y *Frequency Division Multiplexing* (FDM) (Park *et al.*, 2015).

NOMA multiplexa los flujos de datos en diferentes capas superpuestas no ortogonales utilizando diferentes niveles de inyección de potencia a través de todos los recursos disponibles de tiempo y frecuencia. Además, mejora la eficiencia espectral significativamente en comparación con las técnicas de acceso múltiple ortogonal convencionales: TDM y FDM, al multiplexar diferentes servicios con distintos requerimientos de robustez y capacidad de datos (Zhang *et al.*, 2016).

El escenario típico en ATSC 3.0 (Advanced Television Systems Committee Standard, 2017; Park *et al.*, 2015) adoptado con NOMA, consta de dos capas: (i) La capa superior o *Core-Layer* (CL) de NOMA, tiene mayor asignación de potencia y ofrece un servicio móvil robusto de televisión de alta definición (HDTV), DVB-T2/NGH (Eizmendi *et al.*, 2014; Gómez-Barquero, Douillard, Moss, Mignone, 2014); esta capa es utilizada para entregar servicios móviles a receptores de interior, portátiles y de mano. (ii) La capa inferior o *Enhanced-Layer* (EL) de NOMA ofrece un servicio de televisión de Ultra alta definición (UHDTV), donde la relación operacional señal-ruido o *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR) es alta, debido a las antenas de recepción grandes y posiblemente direccionales (Zhang *et al.*, 2016); esta capa es utilizada para receptores fijos.

Cuando se reciben señales de múltiples capas, la capa CL puede decodificarse directamente tratando a la capa EL como ruido adicional, mientras que la capa EL se decodifica usando una técnica de cancelación de señal NOMA-CL, que es capaz de ofrecer servicios confiables a receptores móviles: interior, peatonales y de alta velocidad (Zhang *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2015).

Uno de los requisitos del diseño de LTE fue soportar transmisiones punto a multipunto (PTM) (Hartung *et al.*, 2007) para transmitir eficientemente en modo *multicast* o *broadcast* el mismo contenido a todos los usuarios en una celda, que es en lo que se basa este trabajo de investigación. Para ello, en LTE esta novedad se conoce como *Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service* (eMBMS), definida por el estándar 3GPP en la *Release 9*, también conocida como *LTE Broadcast* (Huschke, & Phan, 2013).

Los diferentes estudios encontrados han aportado significativamente en la evolución técnica de las redes móviles, investigaciones demuestran la ganancia de NOMA en el nuevo estándar de televisión digital terrestre ATSC 3.0. Es por esta razón que el objetivo de esta investigación es evaluar el rendimiento de NOMA convencional en sistemas LTE, en relación con las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM y FDM, con la finalidad de conseguir una mayor eficiencia espectral que beneficie a la comunicación móvil. Para ello se realiza un estudio detallado del simulador de LTE a nivel de la capa física, se adecúa el mismo con los parámetros del sistema NOMA y se procede a realizar las simulaciones respectivas para comprobar las ganancias de este sistema con respecto a los sistemas convencionales; en la siguiente sección se detalla el proceso metodológico de esta investigación.

2 Metodología

La metodología de esta investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que es secuencial y probatoria, con datos representados en forma de números que son analizados estadísticamente. Este estudio posee un diseño experimental debido a que se evalúa el rendimiento del sistema NOMA convencional en sistemas LTE, en relación con las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM y FDM. Es observacional debido a que se analiza el comportamiento de las variables de estudio y se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones. Esta investigación es sistemática, y el procedimiento desarrollado se puede observar en la figura 1.

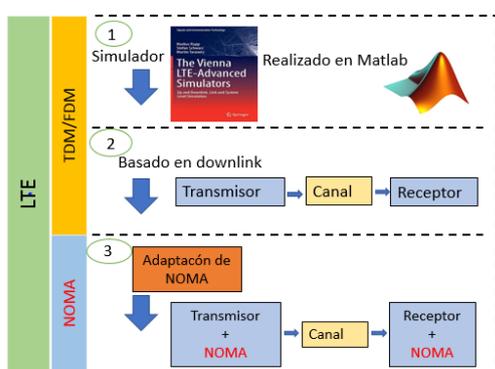


Figura 1: Proceso metodológico de la investigación.

Se ha realizado un estudio detallado del simulador de LTE, a nivel de la capa física. Una vez estudiado y comprendido el funcionamiento del simulador, se procede a añadir los bloques necesarios de NOMA en el transmisor y receptor del simulador. Mediante simulaciones se obtuvieron gráficas de resultados del *Block Error Rate* (BLER), se observó que el demapper *Soft Sphere Decoder* (SSD) original del simulador no tiene un buen funcionamiento con el sistema NOMA, debido a que se abstrae de la potencia de ruido del sistema, por lo tanto, se procedió a introducir el demapper *Maximum Likelihood* (ML). Se realizó la validación del demapper ML comparando sus resultados de medidas de BLER con los resultados del demapper SSD en un sistema FDM/TDM. Una vez validado el demapper ML se procedió a incorporarlo en el sistema NOMA y se utilizó este demapper para el resto de las simulaciones. Se realizaron simulaciones para obtener resultados de los estudios de los demappers ML, SSD en los canales *Additive White Gaussian Noise Channel* (AWGN) y *Pedestrian B* (PedB), y del impacto que tiene el nivel de inyección de NOMA y el *coding rate* (CQI). Con estos resultados de las

simulaciones, se han realizado comparaciones de NOMA con respecto a TDM/FDM, una comparación de las capacidades alcanzables y ganancias obtenidas de los servicios fijos y móviles de NOMA en LTE con respecto a ATSC 3.0.

Como se mencionó anteriormente, NOMA tiene dos capas: CL y EL. La capa CL está diseñada para ofrecer servicios móviles robustos para receptores de interior, portátiles y de mano que probablemente sufran de baja potencia de señal y condiciones de canal ásperas. En la figura 2 se muestra que la capa CL está situada por encima de la capa EL en el espectro de RF; la mayor parte de la potencia de transmisión total está asignada a la capa CL. La capa EL requiere una mayor SNR para proporcionar un servicio de 4k de ultra alta definición (UHD) o múltiples servicios de HDTV; estos servicios están destinados a receptores fijos que podrían tener antenas grandes en lugares altos.

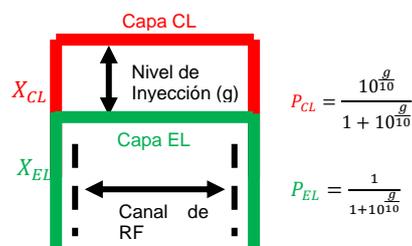


Figura 2: NOMA capas *core layer* (CL) y *enhanced layer* (EL).

La capa CL puede ser decodificada directamente tratando a la capa EL como un ruido adicional, mientras que la capa EL puede ser decodificada usando una técnica de cancelación de la señal.

2.1 Demapper ML

El demapper SSD que utiliza por defecto el simulador no es válido en el sistema NOMA; por lo tanto, se requirió la incorporación del demapper ML que minimiza la probabilidad de error de los bits de código transmitidos y se expresa en forma de *Log-Likelihood Ratio* (LLR). A partir del vector de símbolos recibidos y del vector de canales H, se calcula los LLR para todos los bits codificados (Fuentes, 2017). Para el cálculo de LLR Λ_1 , se calcula un número total de N distancias entre el símbolo recibido y todos los símbolos de constelación x.

$$\Lambda_1 = \log \frac{\sum_{x \in X_1} \exp\left(-\frac{|y-Hx|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{x \in X_0} \exp\left(-\frac{|y-Hx|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

donde σ^2 es la varianza de ruido.

En el apartado de resultados se valida el demapper ML para la utilización en el sistema NOMA. Una vez validado el demapper ML, se procede a incorporarlo en el sistema NOMA. Para las capas CL y EL se realiza el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.2, modificando el cálculo de los LLR, para lo cual se utiliza la ecuación (1).

2.2 Simulador de VIENNA LTE a nivel de enlace

El Institute of Telecommunications Vienna University of Technology (2016), realiza un breve resumen de cómo utilizar el simulador LTE del nivel de enlace, el mismo cuenta con información sobre su estructura y las suposiciones que se hicieron al desarrollarlo. El concepto y la estructura del simulador se describe con más detalle en el trabajo realizado por Mehlführer, Wrulich, Ikuno, Bosanska, & Rupp, (2009).

2.2.2 Canal

El simulador de nivel de enlace LTE se publica bajo una licencia de uso académico no comercial; algunas partes del código están bajo la Licencia Pública General Menor (GNU) (GNU Operating System, 2018) y la Licencia del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) (Open Source Initiative, n. d.).

2.2.1 Transmisión

Este trabajo se basó en la transmisión *downlink* de LTE, la diferencia con *uplink* es que la señal en tiempo y frecuencia tiene un comportamiento totalmente diferente, como se observa en la figura 3.

Según el estándar 3GPP TS 36.211 V10.6.0 Release 10 (European Telecommunications Standards Institute, 2013) y 3GPP TS 36.212 V14.2.0 Release 14 (European Telecommunications Standards Institute, 2017) en la sección 5.1: la transmisión de un canal físico inicia con la generación de palabras código, posteriormente continua por diferentes bloques y finalmente se genera la señal OFDM en el

dominio del tiempo para cada puerto de antena. La salida de este bloque se transmite directamente hacia el terminal de usuario; este proceso se encuentra descrito específicamente en la figura 4.

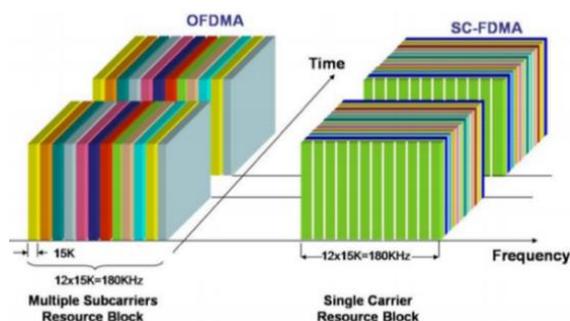


Figura 3: Asignación de recursos con OFDMA y SC-FDMA en tiempo y frecuencia (European Telecommunications Standards Institute, 2009).

Recepción

La figura 5 muestra el diagrama de bloques de recepción en LTE. A la señal recibida se remueve el prefijo cíclico (CP), después se realiza la *Fast Fourier Transform* (FFT), se procede a desensamblar los símbolos de referencia, después se realiza una estimación del canal y ruido. Se realiza una detección a los símbolos recibidos. Se deshace el mapeado de capas para obtener las codewords, para ello se realiza el desentrelazado.

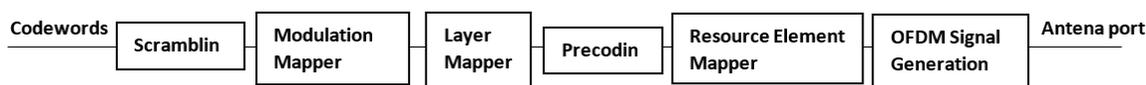


Figura 4: Descripción general del procesamiento de canales físicos (European Telecommunications Standards Institute, 2013; European Telecommunications Standards Institute, 2017).

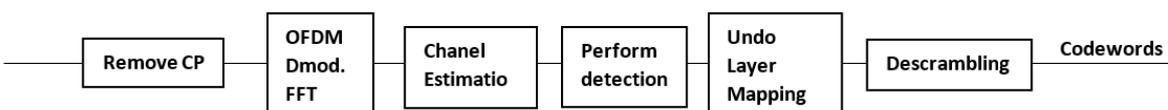


Figura 5: Diagrama de bloques de la parte de recepción en LTE.

2.3 Adaptación de NOMA al simulador de VIENNA

2.3.1 Transmisión

Se realiza un procedimiento similar al explicado en la sección 3.2.1 de este documento, como se puede observar en la figura 6, la diferencia es la existencia de 2 capas, CL y EL. Estas capas serán transmitidas a distinto nivel de potencia, cada capa depende del CQI; en este trabajo se realizaron configuraciones de los CQI del 1 al 6 para la capa CL y los CQI del 9 al 15 para la capa EL. Se realiza una codificación de los bits de entrada de cada capa. Se realiza la modulación de los bits aleatorizados de cada capa, *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) para la capa CL y 16 *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), 64 QAM para la capa EL, y el resto de los procedimientos para cada capa.

La señal transmitida viene dada por la siguiente ecuación:

$$X_{\text{NOMA}}[n, k] = X_{\text{CL}}[n, k] + X_{\text{EL}}[n, k] \quad (2)$$

donde $X_{\text{CL}}[n, k]$, $X_{\text{EL}}[n, k]$, son datos transmitidos de las capas CL y EL en la k-ésima subportadora de n-ésimo símbolo OFDM, respectivamente (Garro, Giménez, Park, & Gomez-Barquero, 2017).

Como el nivel de potencia de la suma de ambas capas debe normalizarse, entonces el nivel de potencia asociada a cada capa se define por el nivel de inyección (g), según las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{CL}} = \frac{10^{\frac{g}{10}}}{1 + 10^{\frac{g}{10}}} \quad (3)$$

$$P_{\text{EL}} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{g}{10}}} \quad (4)$$

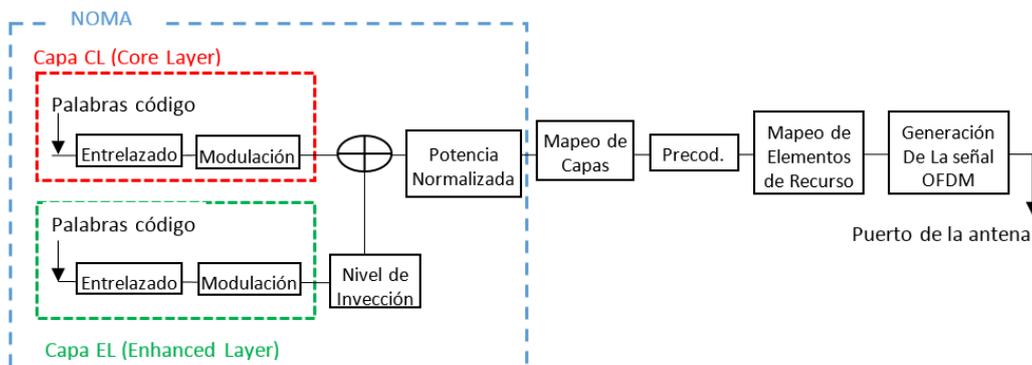


Figura 6: Adaptación de NOMA en LTE VIENNA.

Una vez generadas las dos capas, las señales codificadas de cada capa se superponen símbolo por símbolo a un nivel de inyección seleccionado; el nivel de potencia de la suma de las señales se normaliza a la unidad.

2.3.2 Recepción

En la figura 7, se puede observar los bloques de NOMA añadidos en LTE, donde la señal recibida viene dada por la ecuación (5), donde $Y_{\text{CL}}[n, k]$, $Y_{\text{EL}}[n, k]$, son datos transmitidos de las capas CL y EL en la k-ésima subportadora de n-ésimo símbolo OFDM, respectivamente.

$$Y_{\text{NOMA}}[n, k] = Y_{\text{CL}}[n, k] + Y_{\text{EL}}[n, k] = (X_{\text{CL}}[n, k] + X_{\text{EL}}[n, k])H[n, k] + N[n, k] \quad (5)$$

La capa CL puede ser decodificada directamente tratando a la capa EL como un ruido adicional (Montalban *et al.*, 2013); mientras que la capa EL puede ser decodificada usando una técnica de cancelación de la señal.

Para detectar la señal para la capa EL, se añade una complejidad (Park *et al.*, 2016). Para decodificar la capa EL se debe remodular la capa CL previamente obtenida y, a continuación, cancelarla de $Y_{\text{NOMA}}[n, k]$. A partir de la ecuación (5) la capa EL recibida se puede estimar como:

$$Y_{\text{EL}}[n, k] = Y_{\text{NOMA}}[n, k] - \hat{X}_{\text{CL}}[n, k]\hat{H} \quad (6)$$

donde \hat{X}_{CL} representa la capa CL remodulada, y \hat{H} es la estimación del canal.

La capa EL está destinada a proporcionar servicios de alta capacidad a receptores fijos en SNRs altas, que deben garantizar fácilmente la detección perfecta de la capa CL, es decir, $\hat{X}_{\text{CL}}[n, k] = X_{\text{CL}}[n, k]$.

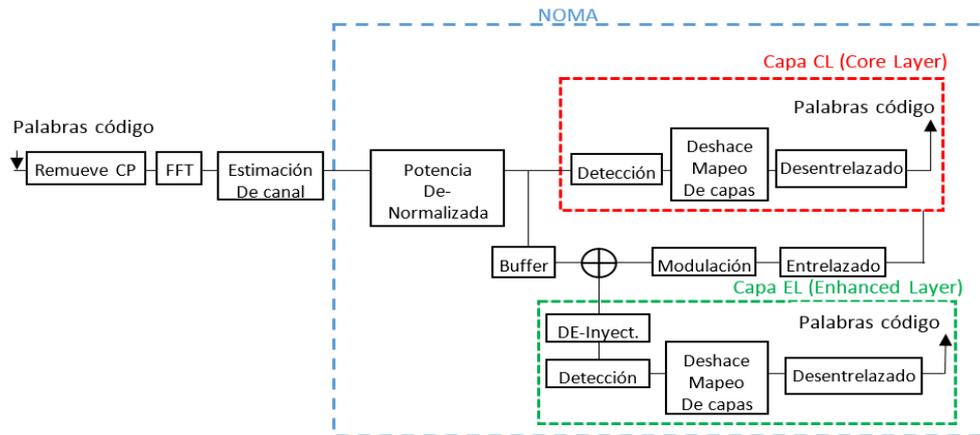


Figura 7: Adaptación de NOMA en la recepción.

3 Resultados

Los resultados obtenidos son medidas de *Block Error Rate* (BER) de la tecnología TDM/FDM con los demappers SSD y ML; después se procede a obtener resultados de medidas de BER, pero en este caso con la tecnología de NOMA adaptado en el sistema LTE, se obtienen gráficas de rendimiento de la capa CL y EL para un canal AWGN y un canal PedB. Se obtiene una tabla de resultados comparativa entre NOMA y FDM/TDM y posteriormente una tabla de resultados con las ganancias de NOMA.

3.1 Validación del demapper ML

En la figura 8 se pueden observar los resultados de medidas de BLER obtenidos de las simulaciones de los demappers SSD, ML en un sistema FDM/TDM en un canal AWGN. Se comprueba que el demapper ML es válido para ser utilizado en un sistema FDM/TDM, debido a que los resultados son iguales al demapper SSD. Los resultados del demapper SSD se corroboran con el documento guía “*LTE Simulators LTE-A Link Level Simulator Documentation*”, v1.4 Q2 (Institute of Telecommunications Vienna University of Technology, 2016).

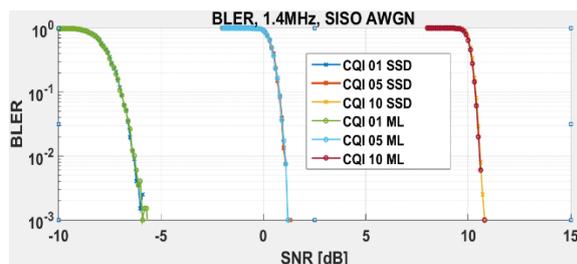


Figura 8: Demappers ML y SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal AWGN.

Posteriormente se realizó pruebas utilizando el canal PedB. En la figura 9 se puede observar que el demapper ML es válido para ser utilizado en un sistema FDM/TDM, debido a que los resultados son iguales al demapper SSD; estos se corroboran en el libro de Rupp, Schwarz, & Taranez (2016) en el capítulo 8.2.2.

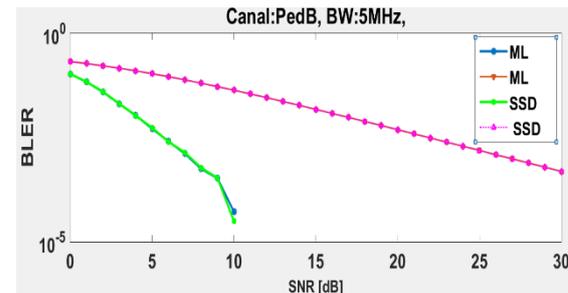


Figura 9: Demappers ML y SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal PedB.

3.2 Constelaciones de las capas CL, EL y la suma de las capas

Al realizar la modulación de los bits aleatorizados de cada capa, QPSK para la capa CL y 16 QAM, para la capa EL, se obtuvieron las constelaciones generadas por el simulador, representadas en la figura 10 y figura 11.

Al realizar la suma de las capas se normaliza la potencia a uno para poder transmitirlos; el resultado se observa en las figuras 12, 13 con 4dB y con 10dB, respectivamente.

3.3 Estudio de los demappers ML y SSD en el sistema NOMA

Como se ha mencionado en la “Introducción del demapper ML” de la sección de “Metodología” de

este documento, en un sistema NOMA la capa EL se considera como un ruido adicional. Mediante los resultados de simulaciones de medidas de BLER de la figura 14 y figura 15, la sensación que brinda el demapper SSD es que no considera el ruido del sistema NOMA. No obstante, para validar que los resultados son correctos, se usa las ecuaciones de aproximación teórica del SNR según (Montalban *et al.*, 2014). Así también en estas figuras se pueden encontrar las SNR de cada capa. Para los CQI 01, 05, 10 y 15 son -5.9 dB y 1.2 dB correspondientemente, y Δ es el nivel de inyección, que en este caso es igual a -4 dB.

En la figura 15 se puede observar que, para la capa EL, la curva de BLER utilizando el demapper SSD se mantiene constante (no cae); esto quiere decir que existe un 100% de tasa de error y no es posible decodificar la señal recibida, mientras que los resultados utilizando el demapper ML son muy parecidos a los resultados teóricos. Estos resultados brindan la sensación de que el demapper SSD se abstrae del ruido de potencia del sistema NOMA. Puesto que la potencia de ruido es alterada en NOMA, es necesario introducir el demapper ML.

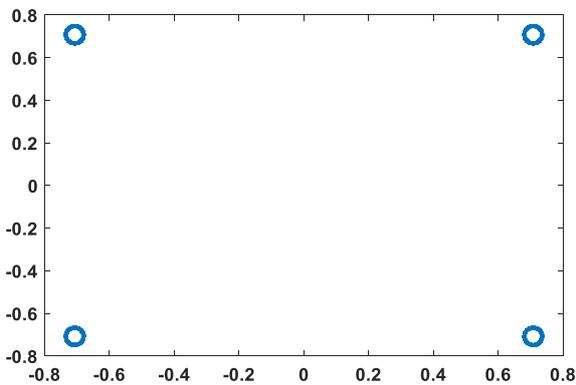


Figura 10: Constelaciones QPSK para la capa CL.

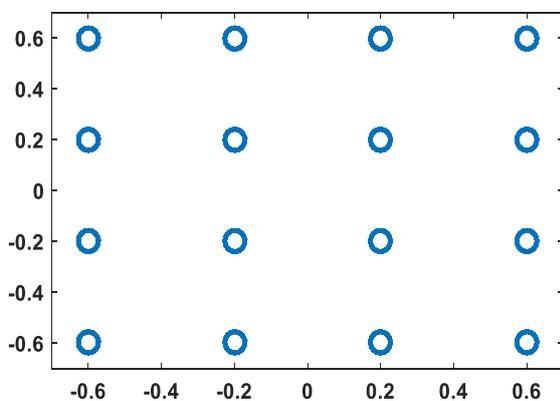


Figura 11: Constelaciones 16QAM para la capa EL.

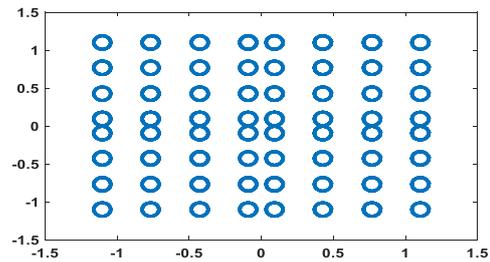


Figura 12: Suma de capas con un nivel de inyección $g=4\text{dB}$.

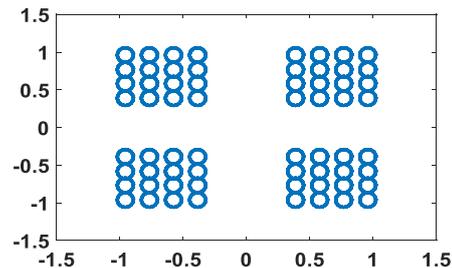


Figura 13: Suma de capas con un nivel de inyección $g=10\text{dB}$.

$$\text{SNR}_{\text{CL,teórico}} = \text{SNR}_{\text{CL,ORIGINAL}} - 10\log_{10}\left(1 - 10^{\frac{\text{SNR}_{\text{CL,ORIGINAL}} + \Delta}{10}}\right) + 10\log_{10}\left(1 + 10^{\frac{\Delta}{10}}\right) \quad (7)$$

$$\text{SNR}_{\text{EL,teórico}} = \text{SNR}_{\text{EL,ORIGINAL}} - \Delta + 10\log_{10}\left(1 + 10^{\frac{\Delta}{10}}\right) \quad (8)$$

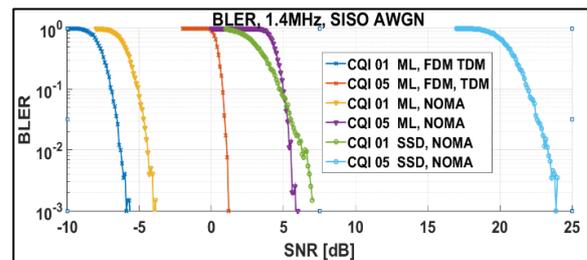


Figura 14: Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa CL, en un canal AWGN.

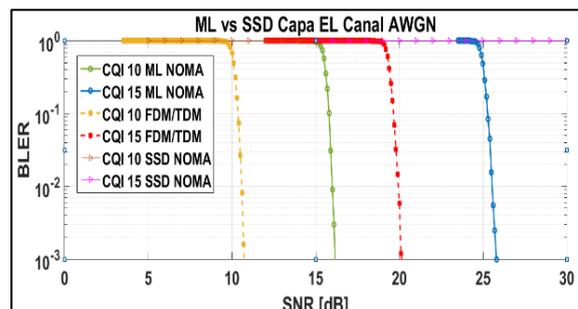


Figura 15: Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa EL, en un canal AWGN.

En la tabla 1 se muestran los resultados de los cálculos de acuerdo con las ecuaciones (7) y (8), y los resultados de acuerdo con las figuras 14 y 15 en un canal AWGN. Tanto para la capa CL como para la capa EL, los resultados esperados mediante la aproximación teórica del SNR se parecen a los resultados gráficos del demapper ML, mientras que con respecto a los resultados del demapper SSD son muy distintos.

Tabla 1: Demapper SSD vs. ML.

Capa	Resultados		Error absoluto		
	Gráficos		Teóricos		
	Demapper		(dB)		
	SSD (dB)	ML (dB)	SSD (dB)	ML (dB)	
CL					
CQI 01	7.00	-3.90	-3.97	10.97	0.07
CQI 05	23.90	6.00	5.89	18.01	0.11
EL					
CQI 10	--	16.10	16.10	----	0
CQI 15	--	25.80	25.46	----	0.34

En la figura 16 se muestran medidas de BLER utilizando los demapper ML y SSD en un canal PedB; en esta figura se pueden observar resultados similares al de la figura 14, se puede ver que el demapper SSD no funciona de forma correcta en el sistema de NOMA, en contraste con ML, el cual tiene un buen funcionamiento.

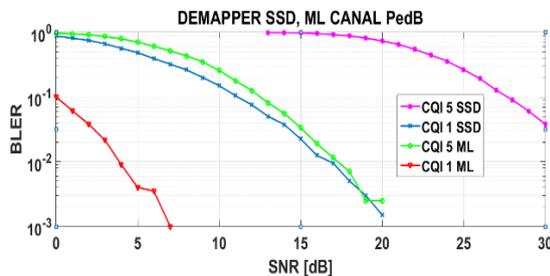


Figura 16: Demapper ML vs. SSD en NOMA, en un canal PedB.

3.4 Impacto de los parámetros configurables de NOMA

Las configuraciones utilizadas en el simulador se muestran en la tabla 2 y las características de cada CQI se muestran en la tabla 3.

3.4.1 Nivel de inyección

Se utilizan los valores 2, 4, 6, 8 dB para evaluar el impacto del nivel de inyección sobre ambas capas

CL y EL. Un CQI 01 es asumido para la capa CL, mientras que para la capa EL se emplea un CQI 10.

En la figura 17 se observa las curvas de NOMA y unicapa, estas son medidas de tasa de error en relación con SNR. Se puede ver que al utilizar un nivel de inyección de 2dB para la capa CL, la curva de NOMA está muy alejada de la curva unicapa y conforme aumenta el nivel de inyección, la curva de NOMA se va acercando a la curva unicapa. Esto quiere decir que a mayor nivel de inyección se asigna mayor porcentaje de potencia a la capa CL; además, esto puede observarse en la figura 2 de la sección 3 de este documento, por tanto, mientras más potencia se asigne a la capa CL, su resultado se asemeja al comportamiento de la transmisión de una sola capa.

Tabla 2: Parámetros utilizados en el simulador.

Parámetros	Valor
Tipo de simulación	SUSISO
Tipo de canal	AWGN
Estimación de canal	PERFECT
Receptor	Maximum Likelihood (ML)
Nivel de inyección	2dB, 4dB, 6dB, 8dB
Capa CL	CQI: 1, 2, 3, 4, 5, 6
Capa EL	CQI: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Tabla 3: Parámetro CQI para cada capa (European Telecommunications Standards Institute, 2013).

CQI	Modulación	Code rate *1024	Eficiencia
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16 QAM	378	1.4766
8	16 QAM	490	1.9141
9	16 QAM	616	2.4063
10	64 QAM	466	2.7305
11	64 QAM	567	3.3223
12	64 QAM	666	3.9023
13	64 QAM	772	4.5234
14	64 QAM	873	5.1152
15	64 QAM	948	5.5547

Tabla 4: Ganancias y pérdidas por efecto del nivel de inyección.

	Capa CL	Capa EL
De 2dB a 4dB	-0.9 dB	1.3 dB
De 4dB a 6dB	-0.7 dB	1.6 dB
De 6dB a 8dB	-0.4 dB	1.6 dB

En la figura 18, se observa que al utilizar un nivel de inyección de 2dB para la capa EL, la curva de NOMA está cerca de la curva unicapa y conforme se va aumentando el nivel de inyección, la curva de NOMA se va alejando de la curva unicapa. Esto quiere decir que al aumentar el nivel de inyección se asigna menor porcentaje de potencia a la capa EL, por tanto, este se aleja de los resultados que se obtienen al transmitir una sola capa.

En la tabla 4 se muestran las ganancias y pérdidas en la SNR umbral que se obtiene al cambiar el nivel de inyección en las capas CL y EL. Existe un mayor cambio de rendimiento para la capa CL, mientras para la capa EL no es notorio el cambio. Esto se debe a que la capa CL está afectada por la capa EL como un ruido interferente y la capa EL está afectada por la reducción de su señal de potencia.

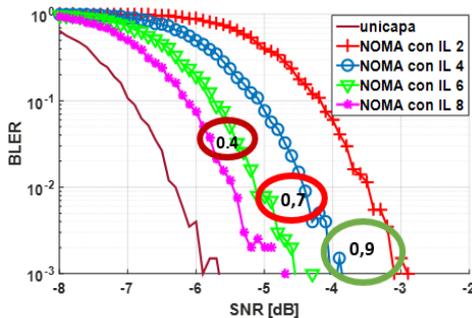


Figura 17: Impacto del nivel de inyección en la capa CL.

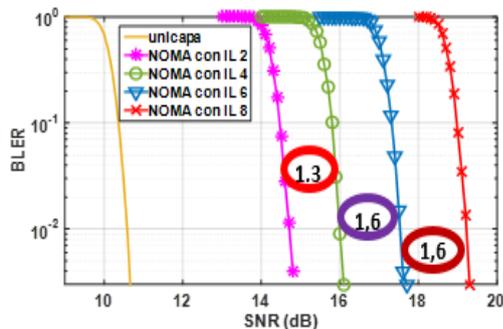


Figura 18: Impacto del nivel de inyección en la capa EL.

3.4.2 CQI de la capa CL

Una vez evaluado el impacto del nivel de inyección, se estudió cómo afecta la robustez de la capa CL utilizando diferentes CQIs. Para ello se ha fijado el CQI 10 de la capa EL y 4dB del nivel de inyección. Las curvas de NOMA de los CQI: 01, 03 y 05 en comparación con las curvas unicapa de los CQI: 01, 03 y 05 del sistema unicapa aumentan 2dB; 3.6dB; 5.8dB de SNR, correspondientemente, tal y como se observa en la figura 19. Por tanto, si se utiliza un CQI robusto, el rendimiento del sistema NOMA

mejorará, debido a que un CQI más alto proporcionará una mejor codificación y a su vez mayor eficiencia espectral, caso contrario existirá un bajo rendimiento.

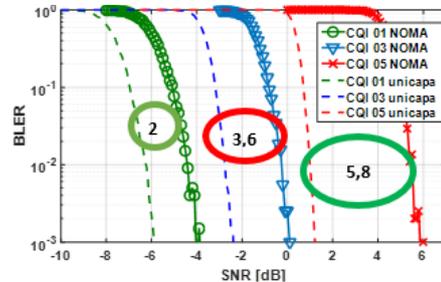


Figura 19: Impacto del CQI en la capa CL.

3.4.3 CQI de la capa EL

Por último, se evalúa el rendimiento de la capa EL con diferentes CQIs. Para ello se ha fijado el CQI 01 de la capa CL y 4dB del nivel de inyección. Las curvas de NOMA de los CQI {07, 10 y 15} en comparación con las curvas unicapa de los CQI {07, 10 y 15} del sistema unicapa, aumentan la SNR en 5.4dB, 5.4dB y 5.7dB, respectivamente, tal y como se observa en la figura 20.

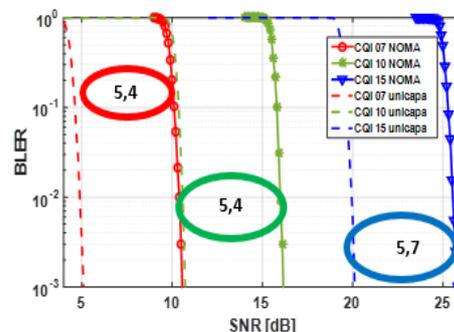


Figura 20: Impacto del CQI en la capa EL.

Por tanto, siempre y cuando la capa CL sea demodulada correctamente para el nivel de inyección dado, el hecho de utilizar un CQI con mayor tasa de eficiencia, debería mantener constante la diferencia del rendimiento entre NOMA y el sistema unicapa.

3.5 NOMA VS. TDM en un canal AWGN

Una vez estudiado los parámetros NOMA individualmente, se procede a comparar el sistema NOMA con el sistema tradicional TDM para demostrar la mayor eficiencia espectral que

proporciona NOMA. Para ello se evalúan distintas combinaciones de CQIs que proporcionan diferentes tasas de transmisión en servicios destinados a recepción móvil y fija.

En la tabla 5 se muestra la comparación de rendimiento entre NOMA y TDM. Para una comparación equitativa, es decir para observar una ganancia de rendimiento dada la igualdad de condiciones de las velocidades de datos, se seleccionaron cuidadosamente los parámetros tales como: el nivel de inyección de NOMA, la asignación de tiempo de TDM, las tasas de transmisión y los órdenes de modulación.

En la figura 21, se muestra una combinación de los servicios móviles y fijos con una tasa de transmisión baja. Para garantizar una tasa de transmisiones en NOMA de 0.15 bps/Hz del servicio móvil y de 1.47 bps/Hz del servicio fijo, se utilizó los CQIs 01 y 07, respectivamente. Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizó los CQIs {02, 03, 04} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo correspondientemente, mientras que para el servicio fijo se utilizó los CQIs {11, 10, 09} que tienen asignado el {42%, 60%, 70%} de tiempo, respectivamente.

En la figura 22 se muestra una combinación de los servicios móviles y fijos con una tasa de transmisión alta. Para garantizar una tasa de transmisiones en NOMA de 0.377 bps/Hz del servicio móvil y de 3.9 bps/Hz del servicio fijo, se utilizó los CQIs {03 y 12}, respectivamente.

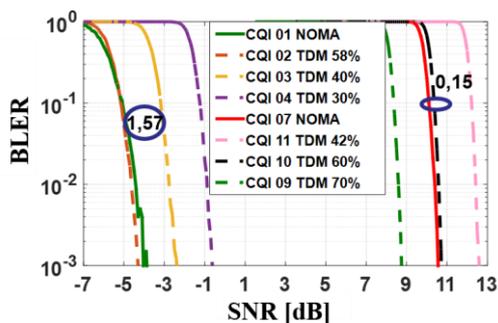


Figura 21: Tasas de transmisión BAJAS de los servicios móviles y fijos.

Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizó los CQIs {04,

05, 06} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo, respectivamente, mientras que para el servicio fijo se utilizó el CQI 15 que tienen asignado el 70% de tiempo. Para un menor porcentaje de tiempo para el servicio fijo de 42% y 60% no hay un CQI que brinde la misma capacidad que NOMA, esto es porque la Release'8 sólo proporciona 15 CQIs.

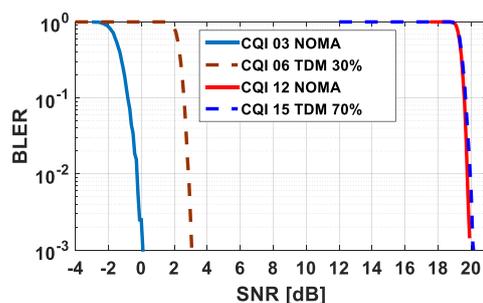


Figura 22: Tasas de transmisión ALTAS de los servicios móviles y fijos.

Para garantizar una tasa de transmisiones media en NOMA de 0.234 bps/Hz del servicio móvil y de 2.4 bps/Hz del servicio fijo, se utilizó los CQIs {02 y 09}, respectivamente. Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizó los CQIs {03, 04, 05} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo, respectivamente, mientras que para el servicio fijo se utilizaría los CQIs {15, 13, 12} que tienen asignado el {42%, 60%, 70%} de tiempo, respectivamente. En la figura 22 se observa que NOMA es mejor que TDM.

Para la tabla 5, se utilizó el canal un AWGN, tanto para el servicio móvil, como para el servicio fijo y se consideran tres sistemas TDM, que asignan {58%, 40%, 30%} de tiempo para los servicios móviles y {42%, 60%, 70%} de tiempo para los servicios fijos.

En la tabla 6 se muestra un sistema de NOMA con 0.377 bps/Hz de la capa CL y 3.32 bps/Hz para la capa EL; existe una ganancia de 5.64 dB sobre un sistema TDM con 58% de la capa CL y 42% de la capa EL en el canal AWGN. Se observó que este caso de NOMA tuvo ganancias de 3.5 dB y 3.6 dB sobre los casos de TDM con [CL 40% / EL 60%] y [CL 30% / EL 70%], respectivamente. Al considerar otras combinaciones móviles y fijas, el sistema NOMA mostró ganancias de alrededor 1.42 dB a 5.64 dB sobre TDM en el canal AWGN.

Tabla 5: NOMA vs TDM en un canal AWGN.

NOMA nivel de inyección -4dB vs. TDM (unicapa)									
Canal AWGN									
Capa CL	Sistema NOMA				Sistema TDM				
	CL (100% Time)		Móvil 58% Tiempo		Móvil 40% Tiempo		Móvil 30% Tiempo		
	Date rate	SNR (dB)	Data rate	SNR	Data rate	SNR	Data rate	SNR (dB)	
Tasa BAJA	CQI 1 0.1523 bps/Hz QPSK 78 /1024	-3.97	CQI 2 0.14 bps/Hz QPSK 120 /1024	-4.3	CQI 3 0.15 bps/Hz QPSK 193 /1024	-2.4	CQI 4 0.18 bps/Hz QPSK 308 /1024	-0.7	
Tasa MEDIA	CQI 2 0.2344 bps/Hz QPSK 120 /1024	-2.15	CQI 3 0.22 bps/Hz QPSK 193 /1024	-2.4	CQI 4 0.24 bps/Hz QPSK 308 /1024	-0.7	CQI 5 0.26 bps/Hz QPSK 449 /1024	1.2	
Tasa ALTA	CQI 3 0.3770 bps/Hz QPSK 193 /1024	0.19	CQI 4 0.35bps/Hz QPSK 308 /1024	-0.7	CQI 5 0.35 bps/Hz QPSK 449 /1024	1.2	CQI 6 0.35 bps/Hz QPSK 602 /1024	3	
Capa EL	EL (100% Time)		Fijo 42% Time		Fijo 60% Time		Fijo 70% Time		
Tasa BAJA	CQI 7 1.47 bps/Hz 16QAM 378 /1024	10.55	CQI 11 1.4 bps/Hz 64QAM 567 /1024	12.6	CQI 10 1.6 bps/Hz 16QAM 466 /1024	10.7	CQI 9 1.6 bps/Hz 16QAM 616 /1024	8.7	
Tasa MEDIA 1	CQI 9 2.4 bps/Hz 16QAM 616 /1024	14.15	CQI 15 2.3 bps/Hz 64QAM 948 /1024	20.01	CQI 13 2.7 bps/Hz 64QAM 772 /1024	16.2	CQI 12 2.7 bps/Hz 64QAM 567 /1024	14.4	
Tasa MEDIA 2	CQI 11 3.32 bps/Hz 64QAM 567 /1024	18.05	-	N/A	CQI 15 3.33 bps/Hz 64QAM 948 /1024	20.01	CQI 14 3.5 bps/Hz 64QAM 873 /1024	18.25	
Tasa ALTA	CQI 12 3.9 bps/Hz 64QAM 666 /1024	19.85	-	N/A	-	N/A	CQI 15 3.9 bps/Hz 64QAM 948 /1025	20.01	

Tabla 6: Ganancia de Noma sobre TDM en un canal AWGN.

Ganancias para tasas bajas			
Móvil	Móvil 58% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0.15bps/Hz	-0.33	1.57	3.27
Fijo	Fijo 42% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
1.47bps/Hz	2.05	0.15	-1.85
Ganancias para tasas altas			
Móvil	Móvil 58% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0.377bps/Hz	-0.89	1.01	2.81
Fijo	Fijo 42% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
3.9bps/Hz	N/A	N/A	0.16

3.5.1 Comparación de NOMA con ATSC 3.0

Las ganancias de NOMA en LTE de la tabla 7 se comparan con las ganancias de NOMA en ATSC 3.0 de la tabla 8. Se puede observar que para una capacidad de 0.34 bps/Hz del servicio móvil de NOMA en ATSC 3.0, en los tres sistemas TDM brinda una mayor ganancia en comparación con una capacidad de 0.37 bps/Hz del servicio móvil NOMA en LTE. Esta ganancia se debe al *low density parity check* (LDPC) que utiliza ATSC 3.0, puesto que es mejor que el *turbo coding* que utiliza LTE.

En el caso del servicio fijo para una capacidad de 2.4 bps/Hz en LTE, en los tres sistemas TDM brinda una mayor ganancia en comparación con una capacidad de 0.25 bps/Hz del servicio fijo de NOMA en ATSC 3.0.

Tabla 7: Ganancia de NOMA sobre TDM en un canal AWGN en LTE.

Móvil	Móvil 58% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0.150 bps/Hz	-0.33	1.57	3.27
0.230 bps/Hz	-0.25	1.45	3.35
0.377 bps/Hz	-0.89	1.01	2.81

Fijo	Fijo 42% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
1.470 bps/Hz	2.05	0.15	-1.85
2.400 bps/Hz	5.86	2.05	0.25
3.320 bps/Hz	N/A	1.96	0.20
3.900 bps/Hz	N/A	N/A	0.16

Tabla 8: Ganancia de LDM sobre TDM en un canal AWGN en ATSC 3.0 (Park *et al.*, 2016).

Móvil	Móvil 55% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0.34 bps/Hz	1.6 dB	3.3 dB	5.7 dB
0.46 bps/Hz	1.7 dB	4.1 dB	5.7 dB
0.81 bps/Hz	1.3 dB	3.4 dB	6.6 dB

Fijo	Fijo 45% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
2.50 bps/Hz	4.4 dB	-0.1 dB	-1.5 dB
3.60 bps/Hz	7.1 dB	2.0 dB	-1.3 dB
4.30 bps/Hz	0N/A	2.3 dB	-0.7 dB
5.27 bps/Hz	N/A	N/A	1.2 dB

3.6 Capacidades de servicios alcanzables con diferentes umbrales SNR de servicio fijo

En el apartado anterior se ha hecho el estudio fijando las tasas de transmisión y se observó las SNR requeridas. En esta última sección se hace el proceso contrario, es decir, fijando las SNR se obtuvieron las tasas de transmisión.

Fijando un umbral de SNR constante de 1.2 dB correspondiente al servicio móvil y diferentes umbrales de SNR de 10.7dB y 20.01dB, correspondiente al servicio fijo, se obtuvieron combinaciones de CQIs, de niveles de inyección, las cuales se muestran en la tabla 9.

La figura 23 se obtuvo mediante las combinaciones de la tabla 9; se comparó la velocidad de datos alcanzables de los servicios móviles y fijos de los sistemas TDM/FDM y NOMA. Se puede observar que la curva de NOMA en un umbral de 20.01dB para el servicio fijo tiene una significativa ventaja de capacidad en comparación con TDM/FDM. Mientras que

para un umbral de SNR de 10.7dB para el servicio fijo, la ventaja no es tan significativa.

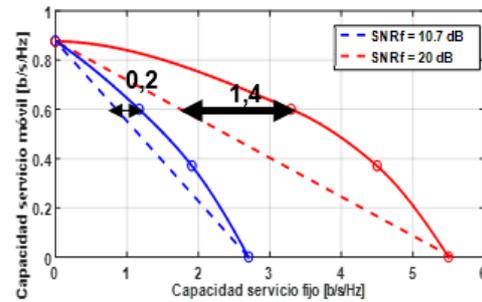


Figura 23: Comparación de capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en LTE.

Tabla 9: Capacidades de servicios móviles y fijos en LTE.

		LTE (eMBMS)	
		SNRm=1.2dB	SNRm=1.2dB
		SNRf=10.7dB	SNRf=20.01dB
		CL=CQI 05	CL=CQI 05
1	(IL=-6.1dB)	capacidad=0.877bps/Hz	capacidad=0.877bps/Hz
		EL----	EL----
3	(IL=-6.1dB)	capacidad=0.6bps/Hz	capacidad=0.6bps/Hz
		EL=CQI 06	EL=CQI 11
4	(IL=-2.5dB)	capacidad=1.17bps/Hz	capacidad=3.32bps/Hz
		CL=CQI 03	CL=CQI 03
2	(IL=-2.5dB)	capacidad=1.91bps/Hz	capacidad=4.5bps/Hz
		EL=CQI 08	EL=CQI 13
		CL-----	CL-----
		EL=CQI 10	EL=CQI 15
		capacidad=2.7bps/Hz	capacidad=5.5bps/Hz

Por tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre los umbrales de SNR de los servicios móviles y fijos, mayor será la ventaja del sistema NOMA. Para el caso de 0.6 bps/Hz del servicio móvil, se pudo conseguir un aumento de 1.17 bps/Hz a 3.3 bps/Hz.

La figura 24 se obtuvo de las combinaciones realizadas en la tabla 10. Los resultados de LTE

se comparan con los de ATSC 3.0, fijando una tasa media de 0.6 del servicio móvil, se consigue una tasa fija de 1.17 bps/Hz en LTE mientras que en ATSC 3.0 se consigue una tasa fija de 1.82 bps/Hz para una SNR móvil (SNR_m) de 1.2 dB y SNR fija (SNR_f) de 10.7dB. En ATSC 3.0 se consigue una tasa de 4.5 bps/Hz mientras que en LTE se consigue una tasa de 3.3 bps/Hz para una SNR fija de 20.01 dB.

Por tanto, ATSC 3.0 proporciona mayores ganancias en NOMA que LTE, se debe principalmente a una mayor eficiencia de la codificación LDPC respecto al turbo código de LTE.

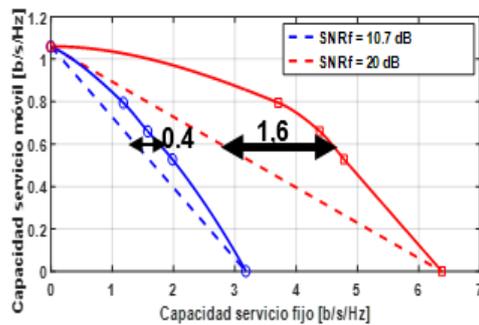


Figura 24: Comparación de capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en ATSC 3.0.

Tabla 10: Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en ATSC 3.0.

		ATSC 3.0	
		SNR _m =1.2dB	SNR _m =1.2dB
		SNR _f =10.7dB	SNR _f =20.01dB
1	CL=QPSK 8/15	capacidad=1.6bps/Hz	capacidad=1.6bps/Hz
	EL----		EL----
3 (IL=-6.7dB)	CL=QPSK6/15	capacidad=0.79bps/Hz	capacidad=0.79bps/Hz
	EL=64NUC3/15	capacidad=1.82bps/Hz	capacidad=3.71bps/Hz
	EL=256NUC7/15		
4 (IL=-3.9dB)	CL=QPSK5/15	capacidad=0.6bps/Hz	capacidad=0.6bps/Hz
	EL=256NUC3/15	capacidad=1.57bps/Hz	capacidad=4.38bps/Hz
	EL=64NUC11/15		
5 (IL=-17dB)	CL=QPSK5/15	capacidad=0.5bps/Hz	capacidad=0.5bps/Hz
	EL=256NUC3/15	capacidad=1.92bps/Hz	capacidad=4.78bps/Hz
	EL=64NUC12/15		
2	CL--		CL--
	EL=64NUC8/15	capacidad=3.18bps/Hz	capacidad=3.18bps/Hz

4 Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado el rendimiento del nuevo sistema no ortogonal NOMA implantado en ATSC 3.0 sobre el estándar de comunicación móvil LTE.

La incorporación de NOMA tuvo una complejidad adicional para transmisión y recepción. El receptor móvil de la capa CL, es el mismo, tanto para un sistema NOMA como para sistemas unicapa tradicionales. El receptor fijo o capa EL, es capaz de decodificar ambas capas añadiendo una complejidad en términos de procesamiento de señal y requerimiento de memoria.

Se ha demostrado mediante resultados teóricos y simulaciones que el demapper SSD no tiene un buen funcionamiento en el sistema NOMA, los resultados demostraron que el demapper SSD no toma en cuenta el ruido de potencia del sistema; este ruido cambia en NOMA, por lo cual se incorporó el demapper ML que fue validado mediante simulaciones y resultados teóricos en el sistema NOMA.

Se ha evaluado el impacto que tiene cada parámetro de NOMA en un sistema LTE y se pudo determinar que, al utilizar un CQI robusto, el rendimiento del sistema mejoró. También depende de la robustez de la capa, siempre y cuando la capa CL se demodule correctamente para el nivel de inyección dado. El hecho de utilizar un CQI con mayor tasa de eficiencia mantendrá constante la diferencia del rendimiento entre NOMA y el sistema unicapa.

Se ha comprobado que NOMA es mejor que TDM en los casos que se utilice una tasa baja (0.15 bps/Hz) en el receptor móvil y una tasa media (2.4 bps/Hz) en el receptor fijo; los resultados demostraron ganancias de 3.35 dB y 0.25 dB, respectivamente.

Adicionalmente en esta investigación, se ha realizado una comparación del sistema NOMA vs. LTE con ATSC 3.0 y se observó que NOMA en ATSC 3.0 es mejor; esto se debe principalmente a que la codificación LDPC es más eficiente respecto al turbo código de LTE.

El trabajo presentado en este documento representa un gran aporte debido a que se demuestra que aplicar la técnica NOMA permitirá realizar una transmisión en diferente nivel de potencia garantizando una mayor eficiencia espectral y representando un mejor

rendimiento con respecto a las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM y FDM. En trabajos futuros se realizarán estudios en canales realistas (canal TU-6 para la capa CL y canal DVB-F1 Rice para la capa EL) y se realizará pruebas con la nueva variante de NOMA conocida como MUST en el ámbito de 5G.

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés de naturaleza alguna.

Agradecimiento

Los autores realizan un agradecimiento al PhD. José Francisco Monserrat, investigador del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la Universidad Politécnica de Valencia, quien fue guía clave para realizar esta investigación.

Referencias

Advanced Television Systems Committee Standard. (2017). *Physical layer Protocol (A/322:2017)*. Recuperado de <https://www.atsc.org/wp-content/uploads/2016/10/A322-2017a-Physical-Layer-Protocol.pdf>

Eizmendi, I., Velez, M., Gómez-Barquero, D., Morgade, J., Baena-Lecuyer, V., Slimani, M., & Zoellner, J. (2014). DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system. *IEEE transactions on broadcasting*, 60(2), 258-271. <https://doi.org/10.1109/TBC.2014.2312811>

European Telecommunications Standards Institute. (2009). *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. (ETSI TS 136 213 V8.8.0). Recuperado de https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/08.08.00_60/ts_136213v080800p.pdf

European Telecommunications Standards Institute. (2013). *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. (3GPP TS 36.211 V10.6.0 Release 10). Recuperado de https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/10.06.00_60/ts_136211v100600p.pdf.

European Telecommunications Standards Institute. (2017). *LTE; Evolved Universal Terrestrial*

Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding. (3GPP TS 36.212 V14.2.0 Release 14). Recuperado de https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/14.02.00_60/ts_136212v140200p.pdf

Fuentes, M. (2017). *Non-Uniform Constellations for Next-Generation Digital Terrestrial Broadcast Systems* (Tesis doctoral no publicada). Universitat Politècnica de València, Valencia, España. <https://doi.org/doi:10.4995/Thesis/10251/84743>

Garro, E., Gimenez, J., Park, S., & Gomez-Barquero, D. (2017). Scattered pilot performance and optimization for ATSC 3.0. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 63 (1), 282-292. <https://doi.org/10.1109/TBC.2016.2630304>.

GNU Operating System. (2018). GNU Lesser General Public License, version 2.1. Recuperado de <https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/lgpl-2.1.html>.

Gómez-Barquero, D., Douillard, C., Moss, P., & Mignone, V. (2014). DVB-NHG: The next generation of digital broadcast services to handheld devices. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 60(2), 246-257. <https://doi.org/10.1109/TBC.2014.2313073>.

Hartung, F., Horn, U., Huschke, J., Kampmann, M., Lohmar, T., & Lundevall, M. (2007). Delivery of broadcast services in 3G networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 53(1), 188-199. <https://doi.org/10.1109/TBC.2007.891711>.

Huschke, J., & Phan, M. (2013). An overview of the cellular broadcasting technology eMBMS in LTE. In D. Gomez-Barquero (Ed.) *Next Generation Mobile Broadcasting* (pp. 223-252). London: Taylor & Francis Group.

Institute of Telecommunications Vienna University of Technology. (2016). *LTE Simulators LTE-A Link Level Simulator Documentation, V1.4 Q2*. Recuperado de <http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator>.

Mehlführer, C., Wrulich, M., Ikuno, J. C., Bosanska, D., & Rupp, M. (2009). Simulating the long-term evolution physical layer. In *17th European signal processing conference (EUSIPCO 2009)* (pp. 1471-1478). Glasgow, Scotland https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_175708.pdf

Montalban, J., Rong, B., Wu, Y., Zhang, L., Angueira, P., & Velez, M. (2013). Cloud transmission frequency domain cancellation. In *IEEE International Symposium on Broadband*

Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) (pp. 1-4). London. <https://doi.org/10.1109/BMSB.2013.6621769>.

Montalban, J., Zhang, L., Gil, U., Wu, Y., Angulo, I., Salehian, K., ... & Angueira, P. (2014). Cloud transmission: System performance and application scenarios. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 60(2), 170-184. <https://doi.org/10.1109/TBC.2014.2304153>.

Open Source Initiative. (n. d.). The MIT License. Recuperado de <https://opensource.org/licenses/MIT>.

Park, S. I., Lee, J. Y., Myoung, S., Zhang, L., Wu, Y., Montalbán, J., ... & Hur, N. (2016). Low complexity layered division multiplexing for ATSC 3.0. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 62(1), 233-243. <https://doi.org/10.1109/TBC.2015.2492459>.

Park, S., Lee, J., Myoung, S., Zhang, L., Wu, Y., Montalbán, J., ... & Kim, J. (2015). Low complexity layered division multiplexing for ATSC 3.0. *IEEE Transactions on broadcasting*, 62(1), 233-243. <https://doi.org/10.1109/TBC.2015.2492459>.

Rupp, M., Schwarz, S., & Taranetz, M. (2016). *The Vienna LTE-advanced simulators*. Singapore: Springer. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-981-10-0617-3>.

Wu, Y., Rong, B., Salehian, K., & Gagnon, G. (2012). Cloud transmission: A new spectrum-reuse friendly digital terrestrial broadcasting transmission system. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 58(3), 329-337. <https://doi.org/10.1109/TBC.2012.2199598>.

Zhang, L., Li, W., Wu, Y., Wang, X., Park, S. I., Kim, H. M., & Montalban, J. (2016). Layered-division-multiplexing: Theory and practice. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 62(1), 216-232. <https://doi.org/10.1109/TBC.2015.2505408>.