



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# **Evaluación del Rendimiento de Acceso Múltiple No-Ortogonal (NOMA) en Sistemas LTE (Long Term Evolution)**

*Autor:* Néstor Estrada Brito

*Director:* Jose Francisco Monserrat del Río

*Fecha de comienzo:*

*Lugar de trabajo:* Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM



*Objetivos* — El presente trabajo tiene como principal objetivo evaluar el rendimiento de NOMA en sistemas LTE.

Con el fin de lograr el objetivo principal, los siguientes objetivos secundarios son considerados:

- Implementar los bloques de NOMA necesarios sobre un simulador de nivel de enlace LTE.
- Realizar simulaciones de capa física.
- Comparar las ganancias en términos de eficiencia espectral de NOMA con respecto a TDM/FDM.
- Comparar las ganancias de NOMA-LTE con las ganancias NOMA del estándar de TDT ATSC 3.0.

*Metodología* — En el presente trabajo 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 obtuvo gráficas de resultados del BLER (Block Error Rate), se observó que el demapper SSD original del simulador no tiene un buen funcionamiento con el sistema NOMA ya que se abstrae de la potencia de ruido del sistema, por lo tanto, se procedió a introducir el demapper 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 simulaciones. Se realizó simulaciones para obtener resultados de los estudios de los demappers ML, SSD en los canales AWGN y PedB, resultados 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 NOMA en ATSC 3.0.

*Desarrollos teóricos realizados* — Se ha realizado un análisis del estado del arte que incluye el estudio de la tecnología LTE basado en la capa física, con una descripción general del diagrama de bloques del procesamiento de canales físicos, el estudio de NOMA con un ejemplo muy comprensivo, un estudio general de eMBMS.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio* — El trabajo de laboratorio se ha desarrollado en la etapa de metodología. Así, se ha realizado distintas funciones en Matlab para incorporar los bloques de NOMA en el simulador de Vienna LTE.

*Resultados* — Los resultados obtenidos son medidas de 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 obtiene 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.

*Líneas futuras* — Este trabajo ha sido basado en la reléase 8, pero en la nueva reléase 14 de LTE se ha permitido una nueva combinación de eMBMS. Por tanto, se podrían utilizar el 100 por ciento de las tramas, aumentar el

prefijo cíclico y aumentar el espacio entre portadoras. Se realizarían estudios de rendimiento en una red SFN tendrían mayor cobertura, pero tendrían menor rendimiento es movilidad.

Por otro lado, una nueva variante de NOMA ha sido introducida como objeto de estudio en la 5G conocida como MUST. Esto haría que la suma de capas se realizara a nivel de bits, con lo cual se conseguiría el Gray Mapping para mejorar el rendimiento de la capa EL. En la tesina, NOMA se evalúa en SISO, se podría realizar pruebas de NOMA para MIMO.

*Abstract* — Debido a la creciente demanda de datos a través de las redes móviles, se están considerando nuevas técnicas que incrementen la eficiencia espectral. El acceso múltiple no-ortogonal (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) es una de las técnicas que están siendo evaluadas dentro del 3GPP (Third Generation Partnership Project). NOMA, también conocida como LDM (Layered-Division-Multiplexing), proporciona servicios a múltiples usuarios mediante multiplexación en potencia. Debido la utilización del 100% del tiempo y ancho de banda del sistema mediante el uso de esta técnica, se espera conseguir una mayor eficiencia espectral que las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM (Time Division Multiplexing) o FDM (Frequency Division Multiplexing). Esta ganancia ya ha sido demostrada en el nuevo estándar de televisión digital terrestre ATSC (Advanced Television Systems Committee), ATSC 3.0. En este trabajo se evaluará la utilización de NOMA en sistemas LTE (Long Term Evolution) mediante simulaciones de capa física, y se compararán las ganancias obtenidas con las publicadas en la bibliografía de ATSC 3.0.

Autor: Estrada Brito Néstor email: [neses@teleco.upv.es](mailto:neses@teleco.upv.es)

Tutor: Monserrat del Rio José Francisco email: [jomondel@iteam.upv.es](mailto:jomondel@iteam.upv.es)

Director: Gómez Barquero David

Director externo: Garro Crevillen Eduardo

Fecha de entrega: 08/09/2017

## **ÍNDICE**

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>II.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
II.1	LTE (LONG TERM EVOLUTION) .....	5
II.1.1	CARACTERISTICAS GENERALES.....	5
II.1.2	ESTRUCTURA DE LA TRAMA .....	5
II.1.3	LTE EN DOWLINK .....	6
II.1.4	EMBMS (ENHANCED MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICES)...	9
II.2	NOMA.....	13
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>16</b>
III.1.	SIMULADOR DE VIENNA LTE A NIVEL DE ENLACE. ....	16
III.1.1	TRANSMISIÓN.....	16
III.1.2.	CANAL. ....	18
III.1.3.	RECEPCIÓN.....	18
III.1.4.	CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS.....	18
III.6.	ADAPTACIÓN DE NOMA AL SIMULADOR DE VIENNA.....	19
III.6.1	TRANSMISIÓN.....	19
III.6.2	RECEPCIÓN.....	23
III.6.3	INTRODUCCIÓN DEL DEMAPPER ML. ....	24
III.6.4	CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS.....	26
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
IV.1.	ESTUDIO DE LOS DEMAPPERS ML, SSD EN EL SISTEMA NOMA .....	27
IV.2.	IMPACTO DE: NIVEL DE INYECCIÓN, CQIs DE LAS CAPAS CL, EL.....	28
IV.3.	NOMA VERSUS TDM EN UN CANAL AWGN .....	31
IV.4.	CAPACIDADES DE SERVICIOS ALCANZABLES CON DIFERENTES UMBRALES SNR DE SERVICIO FIJO. ....	34
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>36</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## I. INTRODUCCIÓN.

El proceso evolutivo de las redes móviles ha permitido a las fuertes demandas de usuarios, utilizar 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 provocado un mayor desarrollo de anteriores tecnologías que cumplan con dichos requerimientos, siendo así que, tras el lanzamiento de las generaciones conocidas, llegará el despliegue de la red móvil de quinta generación o 5G.

Ahora bien, la adopción de una nueva generación con nuevas tecnologías, ha involucrado investigaciones y estudios en la evolución de técnicas de las redes móviles que satisfagan las exigencias de los usuarios en cuanto a la eficiencia de todo tipo de servicios, mismos que van desde la televisión digital hasta videoconferencias.

Por consiguiente, NOMA, una técnica de Acceso Múltiple No-Ortogonal, también conocida como multiplexación por División de Capas (LDM), 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 (RF) [1], [2].

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, FDM, al multiplexar diferentes servicios con distintos requerimientos de robustez y capacidad de datos [3].

Asimismo, se han realizado estudios y se ha demostrado teóricamente que NOMA es capaz de ofrecer una ganancia significativa en comparación con FDM / TDM [3]. Gracias a simulaciones por ordenador se probó la ganancia teórica de NOMA en [2]. Y, en efecto, el nuevo estándar de televisión digital terrestre ATSC 3.0 [4], fue recientemente adoptado NOMA [3], [5], puesto que permite un uso más flexible del espectro, consigue una mayor robustez frente a los escenarios de trayectos múltiples sobre redes SFN (Single Frequency Network), y es capaz de ofrecer simultáneamente múltiples servicios.

El escenario típico en ATSC 3.0 adoptado con NOMA, consta de dos capas: la capa superior (CL, Core-Layer) de NOMA, tiene mayor asignación de potencia y ofrece un servicio móvil robusto de TV de alta definición (HDTV), esta capa es utilizada para entregar servicios móviles a receptores de interior, portátiles y de mano. La capa inferior (EL, Enhanced-Layer) de NOMA ofrece un servicio de TV de Ultra alta definición (UHDTV), donde la relación señal-ruido SNR (Signal-to-Noise-Ratio) operacional es generalmente alta debido a las antenas de recepción grandes y posiblemente direccionales [3], esta capa es utilizada para receptores fijos. Cuando se reciben tales señales de múltiples capas, la capa de núcleo (CL) puede decodificarse directamente tratando a la capa de

mejora (EL) como ruido adicional, mientras que la capa EL se decodifica usando una técnica de cancelación de señal NOMA-CL es capaz de ofrecer servicios confiables a receptores móviles (interior, peatonales y de alta velocidad) [3] [5].

Sin duda, los diferentes estudios han aportado significativamente en la evolución técnica de las redes móviles, es por eso por lo que, el presente trabajo pretende evaluar el rendimiento de NOMA en sistemas LTE, para así conseguir una mayor eficiencia espectral que las tecnologías de acceso múltiple ortogonales convencionales TDM, FDM.

## II. ESTADO DEL ARTE

### II.1 LTE (LONG TERM EVOLUTION)

#### II.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES

En la Release 8, LTE fue estandarizado por 3GPP como el sucesor del Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). LTE tiene prestaciones de alta velocidad para telefonía móvil y terminales de datos de cuarta generación 4G, la cual introduce una gran variedad de novedades con respecto a los anteriores estándares, pero la más novedosa es que por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, son soportados por el protocolo IP.

LTE brinda una mayor capacidad y cobertura del sistema, una mejor experiencia del usuario a través de tasas de datos más altas y una menor latencia, reducción de los costos de implementación y operación y una integración perfecta con los sistemas existentes.

Las velocidades de datos para el enlace descendente van de 100 Mbps a 1Gbps, mientras que, para el enlace ascendente, van de 50 Mbps a 500 Mbps. Ofrece un ancho de banda escalable hasta 20 MHz. LTE soportar un radio de celda de hasta 100 km, velocidades de usuario de hasta 350 km / h.

#### II.1.2 ESTRUCTURA DE LA TRAMA

Las transmisiones de enlace descendente y de enlace ascendente se organizan en tramas de radio con 10ms de duración [6]. Hay 2 tipos de trama:

-Tipo 1:

Esta estructura es utilizada tanto para downlink como para uplink, soporta FDD full duplex y half dúplex, como se observa en la Fig.1 se divide en tramas de 10ms y cada trama consta de 20 ranuras temporales (Tslot) de 0,5ms, numeradas de 0 a 19. El conjunto de dos ranuras consecutivas se denomina “*subframe*”, cada *subframe* tiene una duración de 1ms.

Para FDD, 10 *subframes* están disponibles para transmisión de enlace descendente y 10 *subframes* están disponibles para transmisiones de enlace ascendente en cada intervalo de 10 ms. Las transmisiones de enlace ascendente y descendente se separan en el dominio de la frecuencia. En el

funcionamiento FDD semidúplex, el UE no puede transmitir y recibir al mismo tiempo mientras no existen tales restricciones en FDD de dúplex completo [6].

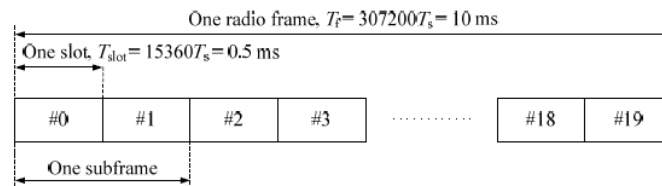


Fig. 1 Estructura de la Trama tipo 1 [6].

-Tipo 2:

Esta estructura es aplicable a TDD, cada trama de radio tiene una duración de 10ms, consta de dos mitades de tramas de 5ms cada uno. Cada media trama consta de cinco *subframes* de 1ms.

Cada *subframe* está formada por dos ranuras (Tslot) de 05ms cada una.

Se soportan configuraciones de enlace ascendente-descendente con una periodicidad de punto de conmutación de enlace descendente-ascendente de 5 ms y 10 ms.

Las *subframes* 0 y 5 y DwPTS siempre están reservadas para la transmisión de enlace descendente. UpPTS y la *subframe* inmediatamente después de la *subframe* especial siempre están reservados para la transmisión de enlace ascendente [6].

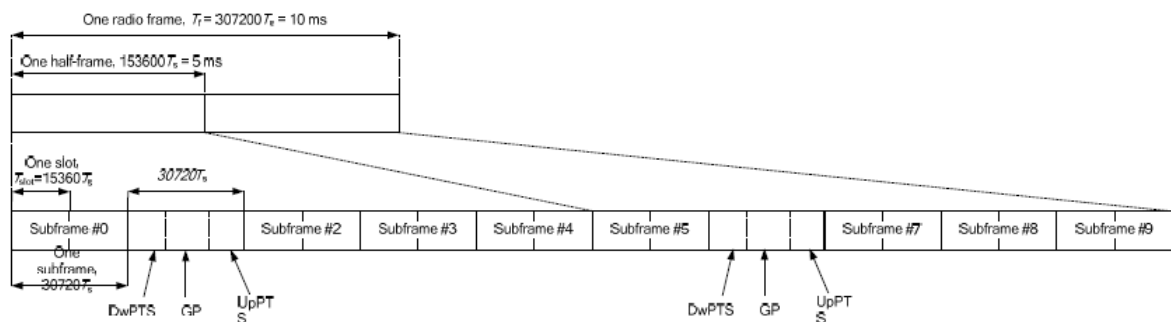


Fig. 2 Estructura de la Trama tipo 2 [6].

### II.1.3 LTE EN DOWNLINK

La multiplexación utilizada en el enlace Downlink es OFDMA, debido a su gran eficiencia espectral y a su reducción del tiempo de latencia. En OFDMA, los usuarios tienen asignados un número específico de subportadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada. Esto es lo que se conoce en las especificaciones de LTE como Resource Blocks (RB) [6].

En la Fig.3 se puede observar la estructura de la red de recursos (Resource Grid), la ranura (slot) y elementos de recursos físicos (physical resource elements). La señal transmitida en cada slot es descrita por una o varias Resource Grid de  $N$  subportadoras  $N_{RB}^{DL}$   $N_{SC}^{RB}$  y símbolos OFDM  $N_{symb}^{DL}$ .



El número de símbolos OFDM depende del prefijo cíclico y del espacio entre subportadoras como se puede ver en la Tabla.1, el número de RB ( $N_{RB}^{DL} * N_{SC}^{RB}$ ) depende del ancho de banda utilizado y del número de subportadoras como se observa en la Tabla.2.

Un puerto de antena está definido de tal manera que el canal sobre el cual se transporta un símbolo en el puerto de antena puede deducirse del canal sobre el cual se transporta otro símbolo en el mismo puerto de antena. Existe una rejilla de recursos por puerto de antena. El conjunto de puertos de antena soportados depende de la configuración de la señal de referencia en la celda descrita en la sección 6.1.1 en [6]. Los RB es definido como símbolos OFDM ( $N_{symbol}^{DL}$ ) consecutivos en el dominio del tiempo y subportadoras ( $N_{SC}^{RB}$ ) consecutivas en el dominio de la frecuencia, estos valores están dados en la Tabla.1. Cada RB tiene ( $N_{symbol}^{DL} * N_{SC}^{RB}$ ) resource elements RE, corresponde a un slot en el dominio del tiempo y 180KHz en el dominio de la frecuencia.

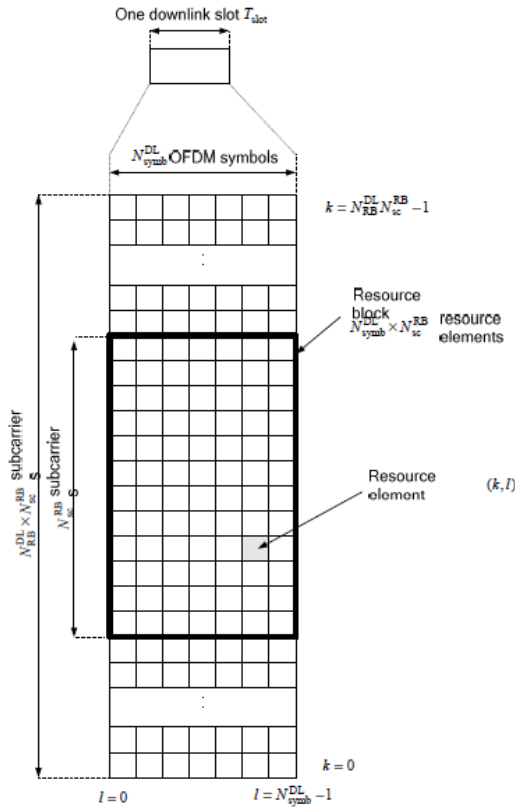


Fig. 3 Estructura del resource grid de Downlink [6].

Configuración Dowlink		$N_{symbol}^{DL}$	$N_{SC}^{RB}$
CP Normal	$\Delta=15$ KHz	12	7
CP Extendido	$\Delta=15$ KHz	12	6
	$\Delta=7,5$ KHz	24	3

Tabla 1 Parámetros RB [6]

BW (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
$N_{SC}^{RB}$	6	15	25	50	75	100
N	128	256	512	1024	1536	2048

Tabla 2 Parámetros RB

Por otra parte, los canales físicos tienen una característica común, la cual es que todos ellos transmiten la información de las capas superiores en la pila de LTE.

Un canal físico de downlink corresponde a un conjunto de RB que transportan información procedente de capas superiores. Se definen los siguientes canales físicos de downlink:

- Physical Downlink Shared Channel, PDSCH
- Physical Broadcast Channel, PBCH
- Physical Multicast Channel, PMCH
- Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH
- Physical Downlink Control Channel, PDCCH
- Physical Hybrid ARQ Indicator Channel, PHICH

Una señal física de downlink corresponde a un conjunto de *resource element* utilizados por la capa física, pero no lleva información procedente de capas superiores. Se definen las siguientes señales físicas de enlace descendente:

- Reference signal
- Synchronization signal

En la Fig.4 se muestra la estructura general para para generar una señal en banda base de canales físicos de downlink.



Fig. 4 Descripción general del procesamiento de canales físicos [6].

La generación de palabras código está basado en los cálculos de CRC (Cyclic Redundancy Check), los cuales añaden a los bits de paridad a los bits recibidos, y a estos se les aplica un *turbo encoder* con relación de codificación 1/3 descrita en la sección 5.1 en [8], luego se pasa por un turbo rate matching descrita en la sección 5.1.4 en [8].

Una vez generado las palabras código se realizan los siguientes pasos:

a) Scrambling: En este bloque se realiza una aleatorización de las palabras clave (codewords) descrita en la sección 6.3.1 en [6].

b) Modulación: En este bloque se realiza la modulación de los bits aleatorizados para generar símbolos complejos usando los tipos de modulación de la Tabla.3 descrita en la sección 6.3.2 en [6].

Canal Físico	Esquemas de modulación
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

Tabla 3 Esquemas de modulación

c) Mapeo de capas: En este bloque se realiza el mapeo de los símbolos generados en una o más capas como se describe en la sección 6.3.3 en [6].

d) Precodificación: En este bloque se realiza la precodificación para ser asignados a recursos en cada uno de los puertos de la antena, para un solo puerto, spatial multiplexing, transmit diversity, como se describe en la sección 6.3.4 en [6].

e) Mapeo en los Resource Elements: Para cada uno de los puertos de antena utilizados para la transmisión del canal físico, el bloque de símbolos de valor complejo se mapeará en secuencia a los *resource elements* correspondientes como se describe en la sección 6.3.5 en [6]. En la sección 6.10 en [6] de 3GPP reléase 10, se encuentra las gráficas del mapeo de los *resource elements* que se utiliza para la transmisión de las señales de referencia en cada puerto de la antena con un prefijo cíclico CP normal y extendido.

f) 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.

Esta tesina se basa en la parte *Dowlink*. La diferencia con *Uplink* es que la señal en tiempo y frecuencia tiene un comportamiento totalmente diferente, como se observa en la Fig. 5.

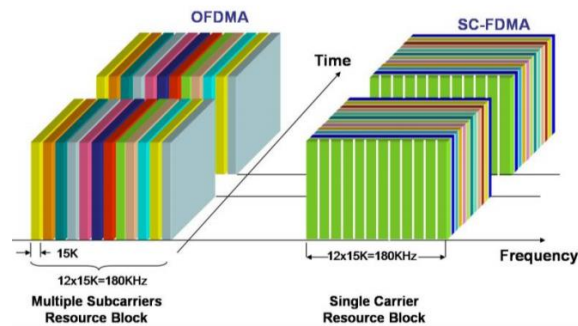


Fig. 5 Asignación de recursos con OFDMA y SC-FDMA en tiempo y frecuencia. [7]

#### II.1.4 EMBMS (ENHANCED MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICES)

Uno de los requisitos del diseño de LTE fue soportar transmisiones punto a multipunto PTM [9] para poder transmitir eficientemente en modo multicast o broadcast el mismo contenido a todos los usuarios en una celda, que es en lo que se basa esta tesina. Para ello en LTE esta novedad se conoce como eMBMS, definida por 3GPP en la Release'9, también conocida como LTE Broadcast [10].

La tecnología eMBMS brinda una integración transparente de las tecnologías de transporte multicast y broadcast en las redes LTE, reutiliza la capa física de LTE, basada en OFDM, y soporta redes SFN (Single Frequency Networks) conocida como MBSFN (*MBMS over Single Frequency Networks*).

Los usuarios pueden experimentar pérdidas de paquetes durante la transmisión de datos con una conexión PTM, debido a desvanecimientos de la señal y otros factores. Por tal motivo, en eMBMS se define un mecanismo de corrección de errores AL-FEC (*Application Layer – Forward Error Correction*), que permite recuperar paquetes IP perdidos en la capa física sin ningún tipo de interacción entre el servidor y los usuarios. Los códigos AL-FEC adoptado en eMBMS son los códigos Raptor [11]. Éstos pueden recuperar pérdidas de paquetes en todas las capas y todos los

protocolos inferiores, pueden corregir paquetes IP erróneos en el núcleo de red o en Internet, no se necesita ningún tipo de modificación o estandarización por debajo de la capa de aplicación.

### II.1.4.1 ARQUITECTURA

Como se muestra en la Fig. 6, eMBMS introduce tres nuevos elementos lógicos en el núcleo de red de LTE ePC (*evolved Packet Core*): el centro de servicio broadcast multicast BM-SC (*Broadcast Multicast – Service Center*), la pasarela eMBMS eMBMS-GW (*eMBMS Gateway*) y la entidad de coordinación multicelda multicast MCE (*Multi-cell/multicast Coordination Entity*).

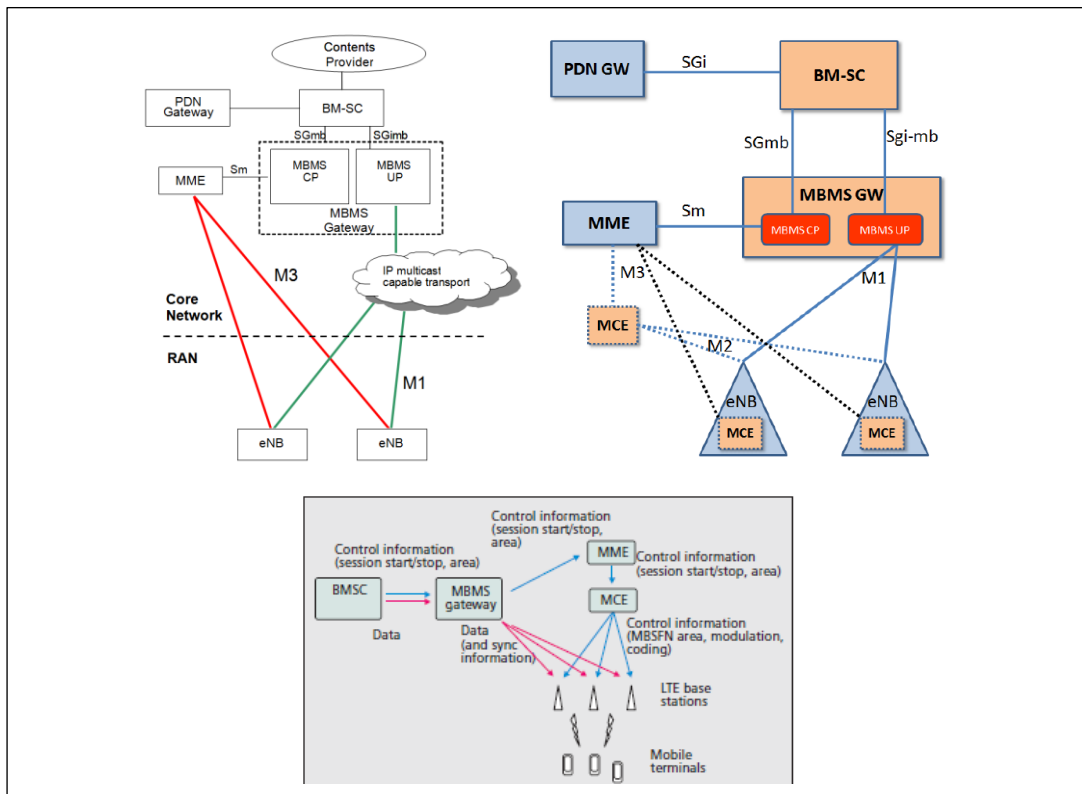


Fig. 6 Arquitectura de la red eMBMS

El BM-SC está ubicado entre el núcleo de la red ePC de LTE y los proveedores de contenidos. Está a cargo del protocolo de sincronización SYNC para sincronizar la información transmitida por los eNBs en modo MBSFN y es el punto de entrada de los contenidos que utilizan eMBMS. Actúa como un servidor, se encarga de anunciar el servicio, configurar la transmisión y la autenticación de los usuarios y el cifrado.

El eMBMS-GW se ubica entre las estaciones base eNBs y el BM-SC, se encarga de la distribución de los datos MBMS a las estaciones base eNB utilizando IP multicast y genera la señalización de control de la sesión para la entidad de gestión de movilidad MME (*Mobility Management Entity*).

El MCE puede ser una entidad lógica independiente o puede integrarse dentro de los eNBs. Se encarga de asignar los recursos de tiempo y frecuencia para eMBMS y decidir la configuración de la transmisión radio, administra los recursos radio de todos los eNB del área MBSFN que transmiten el mismo contenido.

LTE consta de 3 capas: capa física, capa de transporte y capa lógica. La Fig. 7 muestra los canales eMBMS en cada capa, así como los canales de datos unicast. Todos los canales eMBMS pertenecen al enlace descendente y son PTM.

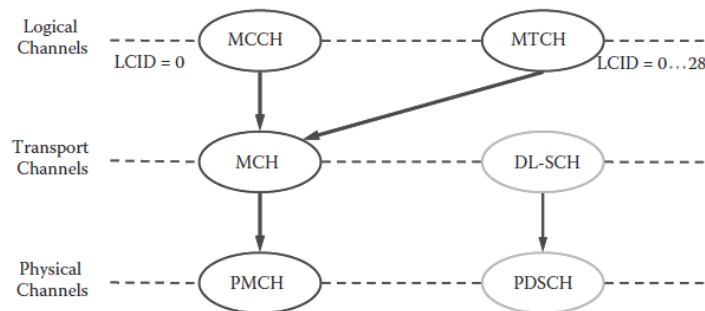


Fig. 7 Canales Lógicos, Canales de Transporte y Canal Físico de eMBMS

Los canales lógicos de eMBMS son: el canal de tráfico multicast MTCH (*Multicast Traffic Channel*) y el canal de control multicast MCCH (*Multicast Control Channel*). Mientras el canal MTCH transmite datos a los usuarios, el canal MTCH transporta información de control de uno o varios MTCH. Un servicio MBMS se transporta en un único MTCH, mientras que un canal MCCH puede contener información de control de uno o varios MTCHs.

Los dos canales lógicos de eMBMS, MTCH y MCCH, se mapean en el canal de transporte multicast MCH (*Multicast Channel*). Este canal se utiliza para MBSFN y, para el modo de operación en una celda aislada, en el que se transmite únicamente en la zona de cobertura de la celda específica. En el modo MBSFN, se transmite de manera sincronizada la misma información del MCH.

Los eNBs multiplexan diferentes canales MTCH, cada uno con un servicio específico, en un mismo canal de transporte MCH, siempre y cuando los servicios compartan la misma área MBSFN. En este caso, los usuarios que estén interesados en un servicio específico deben filtrar el servicio de interés una vez decodificado el bloque de transporte en la capa física. La multiplexación entre áreas MBSFN diferentes no se soporta, para esto se utiliza distintos canales MCH.

Finalmente, el canal de transporte MCH se mapea en el canal físico PMCH (*Multicast Physical Multicast Channel*), que a diferencia del canal físico PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) utilizado por las transmisiones unicast, PMCH utiliza un prefijo cíclico extendido y un patrón de portadoras piloto especial. Todos los canales lógicos MTCH y los servicios multiplexados en el mismo canal físico PMCH utilizan el mismo esquema de modulación y codificación MCS, y por tanto tienen la misma cobertura a nivel de capa física. Cada servicio puede tener una protección específica mediante el mecanismo de corrección en la capa de aplicación AL-FEC.

#### II.1.4.2 RED MBSFN

En una configuración MBSFN, un grupo de celdas se sincronizan temporalmente para transmitir la misma señal a la misma frecuencia, de modo que los terminales reciben la misma señal de varios transmisores, con diferentes retardos temporales según la distancia a los eNB. Gracias a la utilización

de la forma de onda OFDM y la inserción de un prefijo cíclico o intervalo de guarda, las señales recibidas dentro del prefijo cíclico contribuyen positivamente a la señal útil, mientras que las señales con un retraso mayor que el prefijo cíclico crean interferencias entre símbolos OFDM o ISI (*Inter-Symbol Interference*).

El prefijo cíclico es un subconjunto de las muestras finales del símbolo OFDM que se transmiten también al principio del símbolo, y por tanto es un overhead y disminuye la capacidad. La duración del prefijo cíclico representa un compromiso entre overhead (capacidad), robustez al efecto multicamino y distancia máxima entre emplazamientos de la red MBSFN.

Para poder realizar una red SFN, es necesario que todas las estaciones base eNB transmitan exactamente el mismo contenido, las mismas sub-portadoras piloto para estimación de canal. Esto implica que se transmita la misma señal de referencia en las mismas sub-portadoras en tiempo y frecuencia. La configuración utilizada por eMBMS tiene una separación entre sub-portadoras de 2 sub-portadoras en frecuencia y 4 símbolos OFDM en tiempo.

eMBMS reutiliza la capa física de LTE, basada en OFDM, para reducir la latencia del sistema, el intervalo de transmisión temporal es de 1 ms, en el que se puede transmitir una sub-trama. Cada sub-trama se puede utilizar para una transmisión eMBMS o transmisiones unicast. La Tabla. 4 resume los principales parámetros OFDM de las diferentes configuraciones. Se debe destacar que el modo de prefijo cíclico extendido de  $16.7 \mu\text{s}$  con  $\Delta f$  15 kHz es el modo utilizado por defecto para MBSFN.

<b>Prefijo Cíclico</b>	<b><math>\Delta f</math></b>	<b>Overhead PC</b>	<b>ISD SFN</b>
Normal (unicast)	15 kHz	6.5%	1.4 km
Extendido (eMBMS)	15 kHz	20%	5 km
Extendido	7.5 kHz	20%	10 km

Tabla 4 Parámetros OFDM por unidad de recurso RB (*Resource Block*).

Los servicios eMBMS y unicast se multiplexan en el tiempo en modo MBSFN asignando distintas sub-tramas de 1 ms. Gracias a esto, un usuario puede recibir simultáneamente ambos servicios. La Fig. 8 muestra las sub-tramas que se pueden utilizar para eMBMS y qué tramas están reservadas para unicast. Para el modo de operación por duplexado en frecuencia FDD, se pueden asignar hasta 6 sub-tramas de cada 10 dentro de una trama de 10 ms (hasta 5 sub-tramas de cada 10 para TDD).

Se observa en la Fig. 8 que las subtramas número 1, 2, 3, 6, 7 y 8, están reservadas para eMBMS, las sub-tramas 0 y 5 se reservan para la transmisión de las señales de sincronización y las señales de referencia. Las sub-tramas eMBMS pueden ser utilizadas para transmisión MBSFN, mientras que en las sub-tramas unicast cada eNB puede transmitir información diferente. Las sub-tramas MBMS que no tienen contenido para transmitir, pueden ser utilizadas para modos unicast. Las sub-tramas reservadas para transmisiones unicast dentro de una trama radio utilizan el prefijo cíclico normal, mientras que las sub-tramas reservadas para eMBMS utilizan prefijo cíclico extendido. La entidad

de control de los recursos radio RRC (*Radio Resource Control*) informa a los usuarios acerca de qué sub-tramas están reservadas para eMBMS, utilizando para ello los bloques de información del sistema transmitidos a través del canal físico PBCH (*Physical Broadcast Channel*).

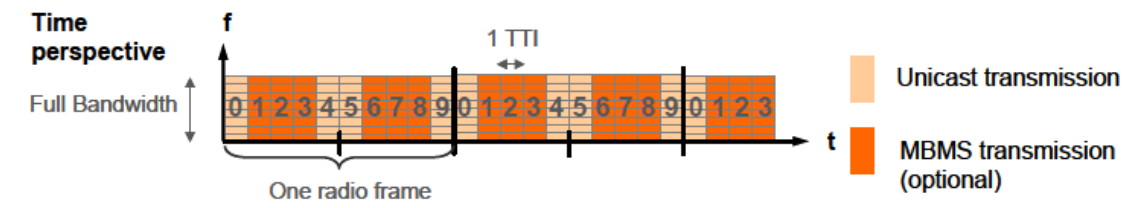


Fig. 8 Multiplexación temporal de datos eMBMS y datos unicast en modo MBSFN. Modo FDD.

## II.2 NOMA

Es una técnica de Acceso Múltiple No-Ortogonal, también conocida como multiplexación por División de Capas (NOMA), la cual proporciona una transmisión simultánea de servicios fijos y móviles en el mismo canal de radiofrecuencia (RF) [1], [2].

Para transmitir las señales multicapa para la eficiencia del espectro, NOMA utiliza el 100% del ancho de banda de RF y el 100% de los recursos de tiempo en comparación con las técnicas de acceso múltiple ortogonal convencionales TDM, FDM, como se observa en la Fig. 9.

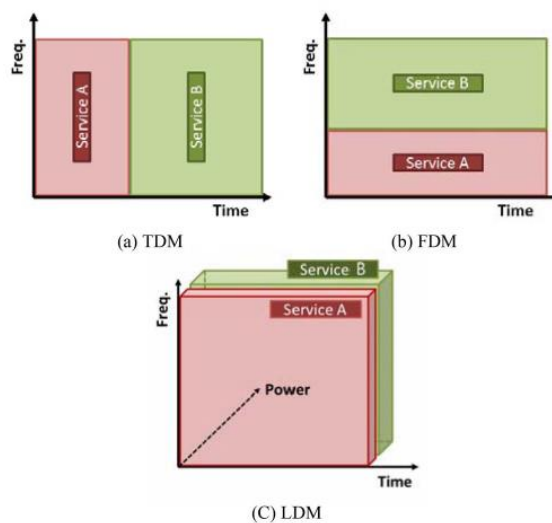


Fig. 9 a) TDM, b) FDM, c) NOMA [5]

En esta tecnología, múltiples contenidos de radiodifusión de cada capa son sometidos a diferentes cadenas BICM (Bit Interleaved and Coded Modulation) para diferente robustez, y se inyectan con diferentes niveles de potencia para la transmisión. Esto hace que esta tecnología sea ideal para proporcionar diferentes tipos de servicios, fijos y móviles.

Tiene dos capas, la capa de núcleo (CL) y la capa mejorada (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 Fig. 10, 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 relación señal-ruido (SNR) para proporcionar un servicio de 4k-UHD o múltiples servicios de HDTV, estos servicios están destinados a receptores fijos que podrían tener antenas grandes en lugares altos.

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. La capa CL es más robusta, y se utiliza para servicios móviles, y la capa EL se utiliza para servicios fijos que tienen mayor relación señal a ruido (SNR).

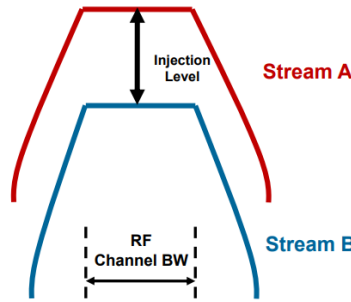


Fig. 10 Transmisión basada en NOMA de 2 capas [5]

### II.1.2.1 TRANSMISIÓN

La señal transmitida viene dada por la ecuación (1).

$$X_{NOMA}[n, k] = X_{CL}[n, k] + X_{EL}[n, k] \quad (1)$$

Donde  $X_{CL}[n, k]$ ,  $X_{EL}[n, k]$ , son datos transmitidos de las capas CL y EL en la  $k$ -ésima subportadora de  $n$ -ésimo símbolo OFDM, respectivamente [12].

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

$$P_{CL} = \frac{1}{1+10^{\frac{g}{10}}} \quad (2)$$

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

En la Fig. 11 se muestra un ejemplo de una transmisión. La capa CL, que necesita transmitir la señal más robusta, utiliza una modulación QPSK y una codificación con un *code rate* de 4/15 para proporcionar una calidad HD de 2,7 Mbps de vídeo en un canal RF de 6 MHz. Esta combinación de modulación y codificación se opera a -2,9 dB SNR cuando se transmite únicamente la capa CL.



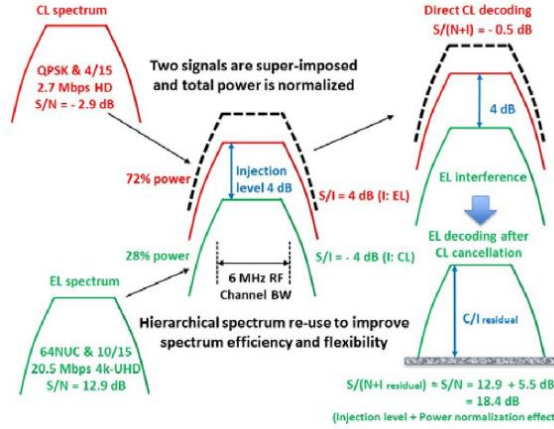


Fig. 11 Proceso de operación del sistema de radiodifusión DTV de dos capas basado en NOMA.

Para la transmisión de la capa EL, utiliza una modulación 64-NUC y una codificación con un *code rate* 10/15, de manera que la calidad de vídeo de 4K-UHD de 20,5 Mbps funciona a 12,9 dB SNR cuando se transmite únicamente la capa EL.

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 señales se normaliza a la unidad. Cuando un nivel de inyección se ajusta a -4 dB referido a CL como se muestra en la Fig. 11, la capa EL se considera como una interferencia con respecto a la capa CL, de este modo el SIR (Signal-to Interference Ratio) es igual a 4 dB. Del mismo modo, desde la perspectiva de la capa EL, SIR es igual a -4 dB, lo que significa que la potencia de interferencia es significativamente mayor que la señal deseada [5]. Teniendo en cuenta el nivel de inyección de -4 dB de la capa EL, la porción de la capa CL fuera de la potencia de transmisión total se puede calcular de acuerdo con la ecuación (2) lo que significa un 72%. Por lo tanto, el 28% restante de la potencia de transmisión total se asigna a la capa EL, tal y como se expresó en la ecuación (3).

### II.1.2.2 RECEPCIÓN

La señal recibida viene dada por la ecuación (4).

$$\begin{aligned}
 Y_{NOMA}[n, k] &= Y_{CL}[n, k] + Y_{EL}[n, k] \\
 &= (X_{CL}[n, k] + X_{EL}[n, k])H[n, k] + N[n, k]
 \end{aligned} \tag{4}$$

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. Para decodificar la capa EL, se debe remodular la capa CL previamente obtenida y, a continuación, cancelarla de  $Y_{NOMA}[n, k]$ . A partir de la ecuación (4) la capa EL recibida se puede estimar como:

$$Y_{EL}[n, k] = Y_{NOMA}[n, k] - \hat{X}_{CL}[n, k]\hat{H} \tag{5}$$

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 los SNRs altos, que deben garantizar fácilmente la detección perfecta de la capa CL, es decir,  $\hat{X}_{CL}[n, k] = X_{CL}[n, k]$ .

### III. METODOLOGÍA

#### III.1. SIMULADOR DE VIENNA LTE A NIVEL DE ENLACE

En [13] se realiza un resumen del modo de utilización del simulador LTE de nivel de enlace, en donde además se indica su estructura y las suposiciones que se hicieron al desarrollarla. El concepto y la estructura del simulador se describe con más detalle en [14].

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 [15], y la Licencia MIT [16].

##### III.1.1 TRANSMISIÓN.

La parte de transmisión se realiza en la función LTE\_TX. Como se indicó en el apartado II.1.3, un canal físico se genera mediante el siguiente proceso que se observa en la Fig. 12.

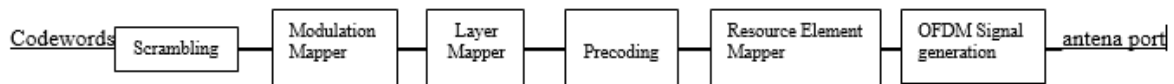


Fig. 12 Descripción general del procesamiento de canales físicos [6].

La codificación de los bits de entrada se realiza mediante la función `LTE_tx_DLSCH_encode`, dentro de esta función se realiza el cálculo de los CRC, se aplica el *turbo encoder* mediante la función `LTE_tx_turbo_encode`, luego se aplica el *rate matching* mediante la función `TE_tx_turbo_rate_matcher`.

Después de tener los bits codificados se realiza los siguientes pasos:

- a) El Scrambling se realiza mediante la función `LTE_common_scrambling`.
- b) La Modulación de los bits aleatorizados para generar símbolos complejos se realiza mediante la variable *nibble* y la función `LTE_params_SymbolAlphabet`, que dependiendo del orden de modulación 2, 4, 6, las constelaciones son BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM correspondientemente, las constelaciones generadas por el simulador se muestran en la Fig. 13 (a, b, c). El orden de modulación, el *coding rate*, y el tipo de constelación utilizado, dependen del CQI (Chanel Quality Indicator) basado en la reléase 8 como se indica en la Tabla.5.

CQI	Modulación	code rate *1024	eficiencia
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,377
4	QPSK	308	0,6016
5	QPSK	449	0,877
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 5 CQI

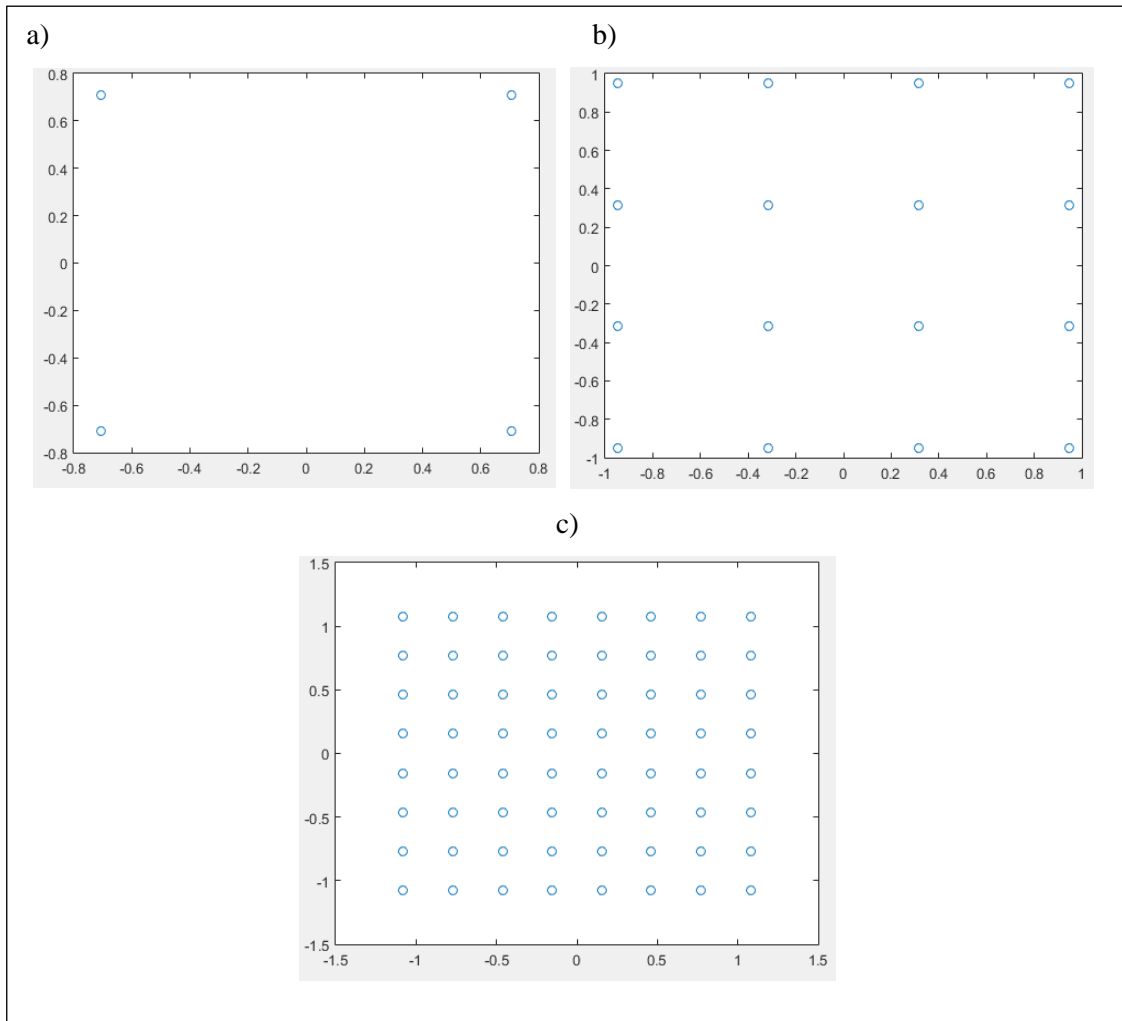


Fig. 13 Constelaciones, a) QPSK, b) 16 QAM, c) 64QAM

- c) El Mapeo de capas se realiza mediante la función `LTE_common_layer_mapping`.
- d) La Precodificación se realiza mediante la función `LTE_precoding`.
- e) En Mapeo en los Resource Elements se almacena en una matriz `y_tx_assembled`, se empieza con el primer *slot* del primer *subframe*. Para cada uno de los puertos de antena utilizados para la transmisión del canal físico, el bloque de símbolos de valor complejo se mapeará en secuencia a los *resource elements* correspondientes.
- f) 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.

### III.1.2. CANAL.

El simulador consta con los siguientes canales: AWGN, Ped-A, Ped-B, flat Rayleigh, PedBcorr, Rayleigh, VehA, VehB, TU, RA, HT, winner\_I. En esta tesina se ha utilizado el canal AWGN y PedB, la configuración del canal se lo realiza en la función `load_parameters`, en donde está la función `susisoSimulationConfig`, en esta se configura el canal en la variable `LTE_params.ChanMod_config.type`

### III.1.3. RECEPCIÓN.

La Fig. 14 muestra el diagrama de bloques de recepción. La recepción se realiza en la función `LTE_RX.m`, a la señal recibida remueve el CP, después se realiza la FFT, después se procede a desensamblar los símbolos referencia, después se realiza una estimación del canal y ruido con la función `LTE_channel_estimator`, en esta función cuenta con diferentes métodos de estimación del canal PERFECT, LS, MMS, en esta tesina se utiliza el método de estimación PERFECT. Se realiza una detección a los símbolos recibidos mediante la función `LTE_detecting`, en esta función se utiliza el demapper SSD mediante la función `LTE_softsphere`.

En la función `LTE_softsphere` se calcula los LLR y se almacena en la variable `LLR_SD`. Una vez calculado los `LLR_SD`, se deshace el mapeado de capas para obtener las *codewords*, para ello se realiza el desentrelazado mediante la función `LLR_SS_descrambled`, Finalmente para obtener las *codewords*, se utiliza la función `LTE_rx_DL_SCH_decode`, dentro de esta función se aplica un *rate de-matching*, *turbo decoding* mediante las funciones `LTE_rx_turbo_rate_matcher`, `LTE_rx_turbo_decode` correspondientemente.

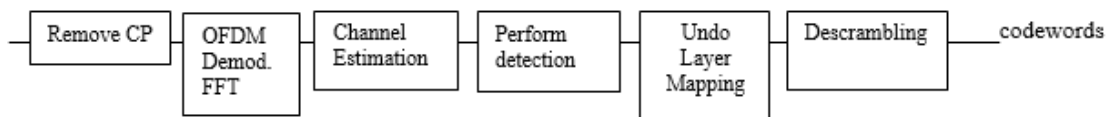


Fig. 14 Diagrama de bloques de recepción

### III.1.4. CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS.

Las configuraciones básicas utilizadas en el simulador se muestran en la Tabla.6.

Parámetros	Valor
Tipo de simulación	SUSISO
Número de usuarios	1
Ancho de Banda	1,4MHz
Prefijo cíclico	Normal

Transmisión HARQ	no
Uplink delay	no
Tipo de canal	AWGN/Ped-B
Filtración	Block Fading
Estimación del canal	PERFECT
Receptor	SSD
Número de frames	2000

Tabla 6 Configuraciones Generales

### III.6. ADAPTACIÓN DE NOMA AL SIMULADOR DE VIENNA.

#### III.6.1 TRANSMISIÓN.

Se realiza un procedimiento similar al explicado en la sección III.1.1, como se puede observar en la Fig.15, la diferencia es que ahora existen 2 capas, CL y EL, estas capas serán transmitidas a distinto nivel de potencia, cada capa depende del CQI como se muestra en la Tabla.5, en esta tesina se realizaron configuraciones, de los CQI del 1 al 6 son para la capa CL, y los CQI del 9 al 15 son para la capa EL. Se realiza una codificación de los bits de entrada de cada capa mediante la función LTE\_tx\_DLSCH\_encode, después de tener los bits codificados se realiza los siguientes pasos:

- a) Se realiza el bloque Scrambling de cada capa mediante la función LTE\_common\_scrambling.
- b) Se realiza la modulación de los bits aleatorizados de cada capa, QPSK para la capa CL y 16 QAM, 64 QAM para la capa EL, las constelaciones generadas por el simulador se muestran en la Fig.16 (a, b, c).

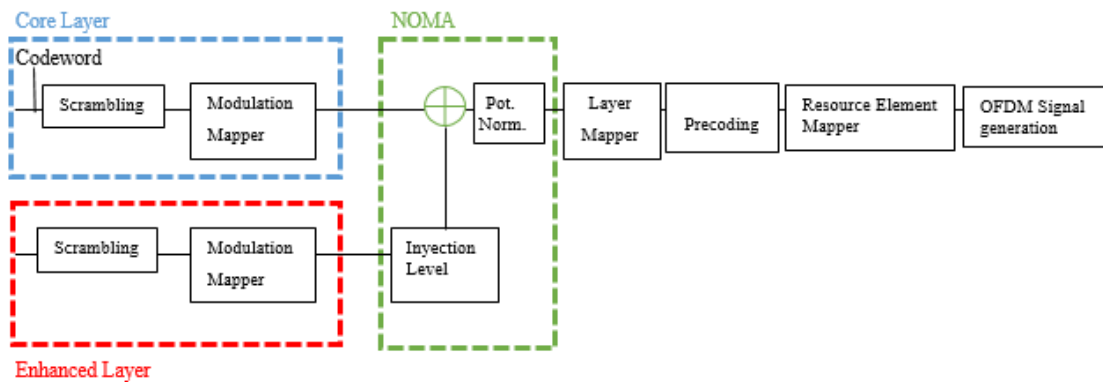


Fig. 15 Bloques de NOMA adaptados en transmisión.

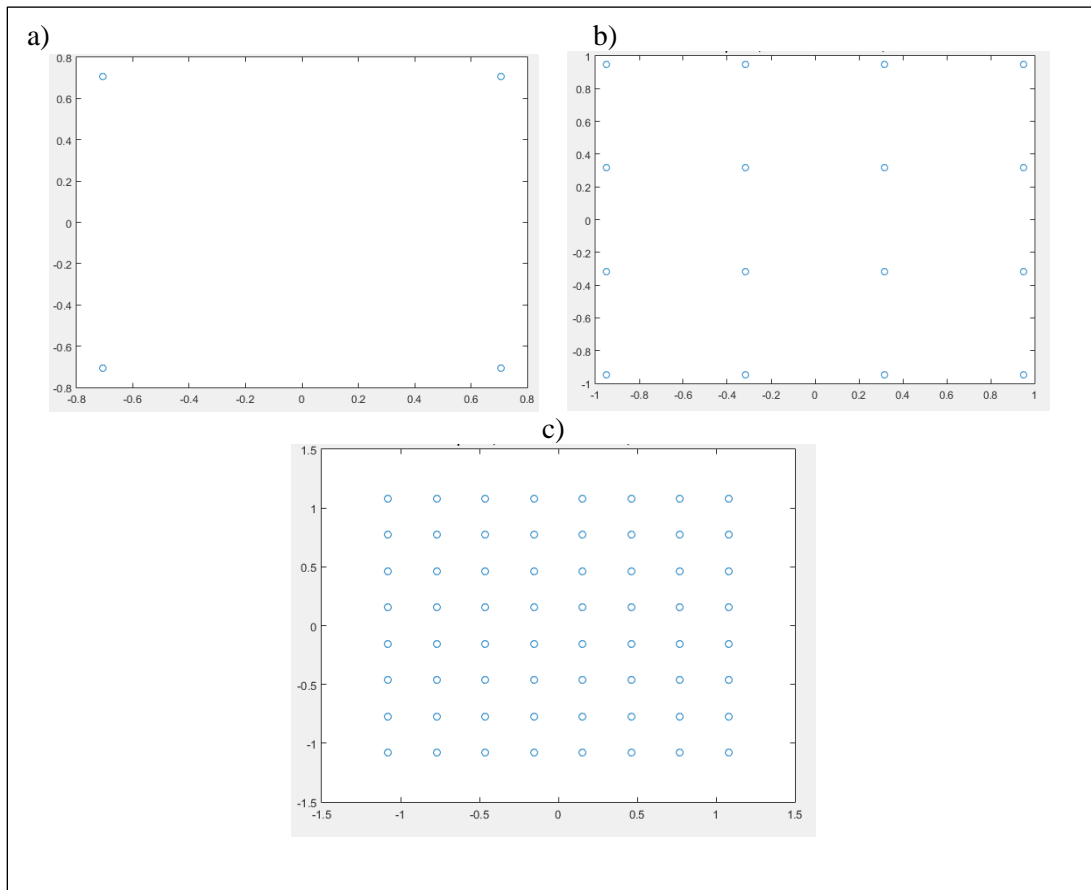


Fig. 16 Constelaciones de la capa CL y EL, a) QPSK, b) 16 QAM, c) 64QAM

Después de obtener los símbolos complejos de la capa CL se asigna a la variable `tx_user_symbols`, y para los símbolos complejos de la capa EL se asigna a la variable `tx_user_symbols_EL`. A la capa EL se multiplica por un IL (Inyección Level) en dB, para que sea transmitida a diferente nivel de potencia, como se muestra en la Fig. 17.

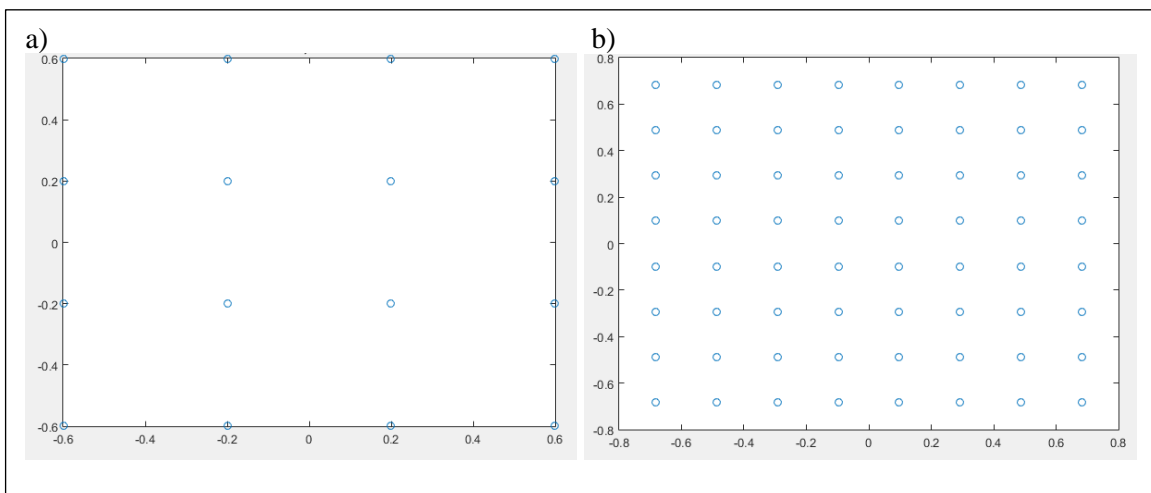


Fig. 17 Capa EL aplicado con un nivel de potencia de -4 dB a) 16 QAM, b) 64 QAM

Se realiza la suma de las capas mediante la ecuación (1, 2, 3) vista en el capítulo II.1.2.1.

```
gtx=10^(-LTE_params.scheduler_EL.Iny_level/20)
tx_user_symbols= tx_user_symbols+gtx* tx_user_symbols_EL
```

El resultado de la suma de las capas a diferente nivel de potencia se puede observar en la Fig. 18, la suma de las capas se guarda en la variable tx\_user\_symbols.

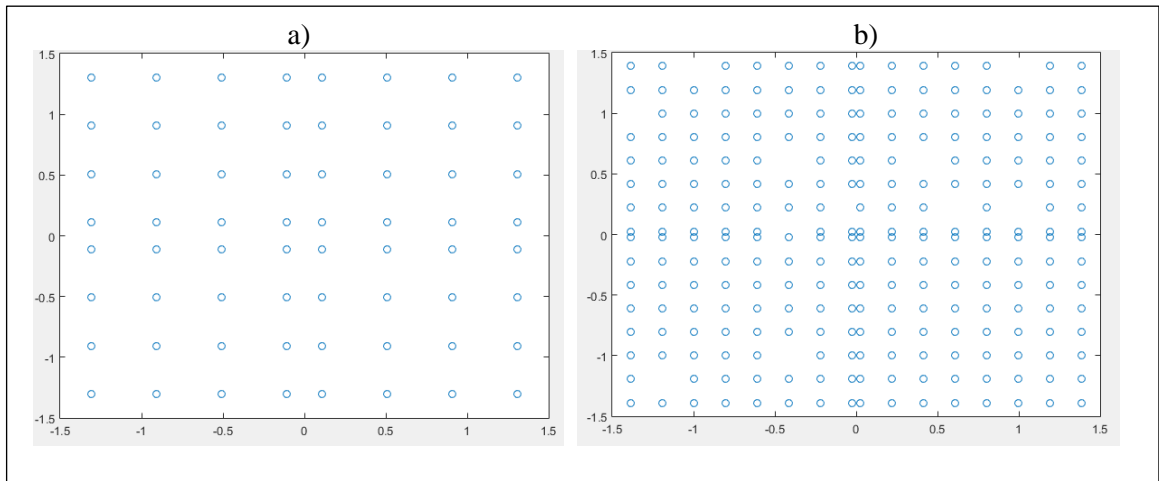


Fig. 18 Suma de capas CL+EL a) QPSK+16 QAM, b) QPSK+64QAM

Una vez realizada la suma de las capas, se normaliza la potencia a 1, su resultado se observa en la Fig. 19.

```
tx_user_symbols=tx_user_symbols./sqrt(1+gtx^2)
```

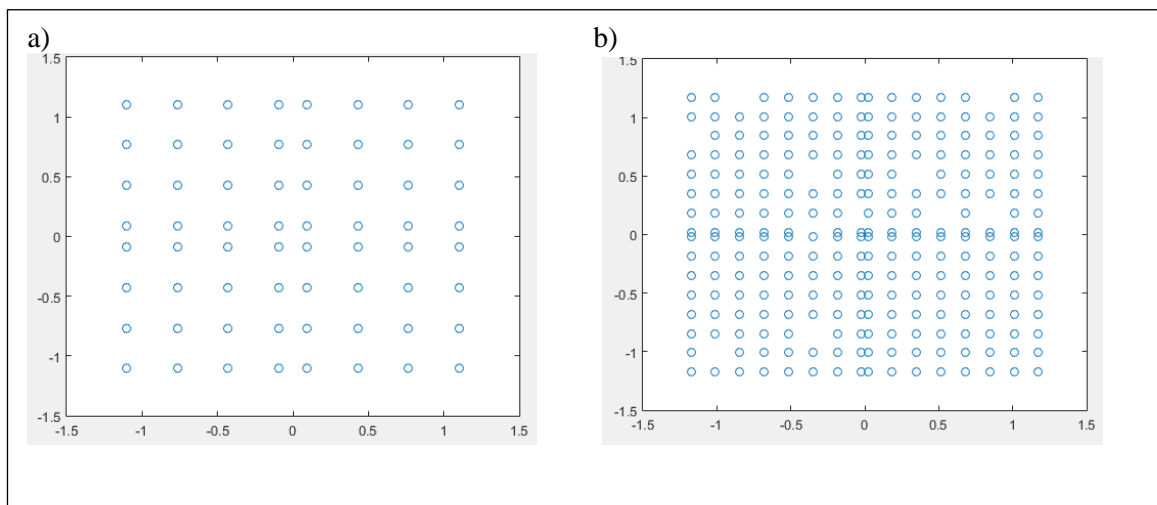


Fig. 19 Suma de capas con potencia normalizada, a) con 16QAM, b) 64 QAM con potencia normalizada.

En la Fig. 20 se muestra la suma de capas con potencia normalizada a distinto IL.

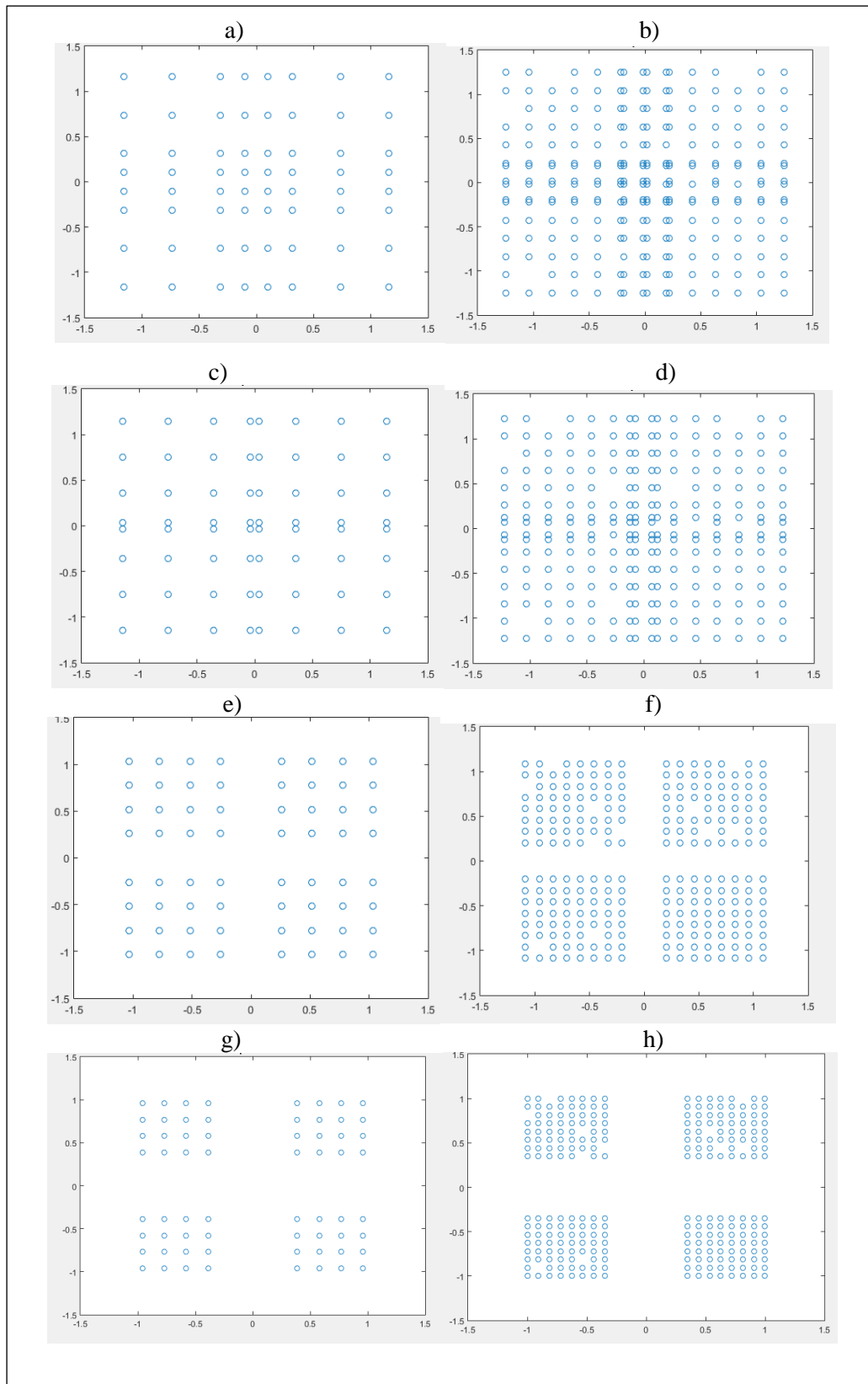


Fig. 20 Suma de capas con potencia normalizada, (a, c, e, g) son CL+EL(16QAM), (b, d, f, h) son CL+EL(64QAM).



Una vez realizada la suma y normalización del nivel de potencia, se procede a realizar el mapeo de capas, la pre-codificación, el mapeo en los *Resource Elements* 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.

### III.6.2 RECEPCIÓN.

En la Fig. 21 se muestra el diagrama de bloques de la parte de recepción.

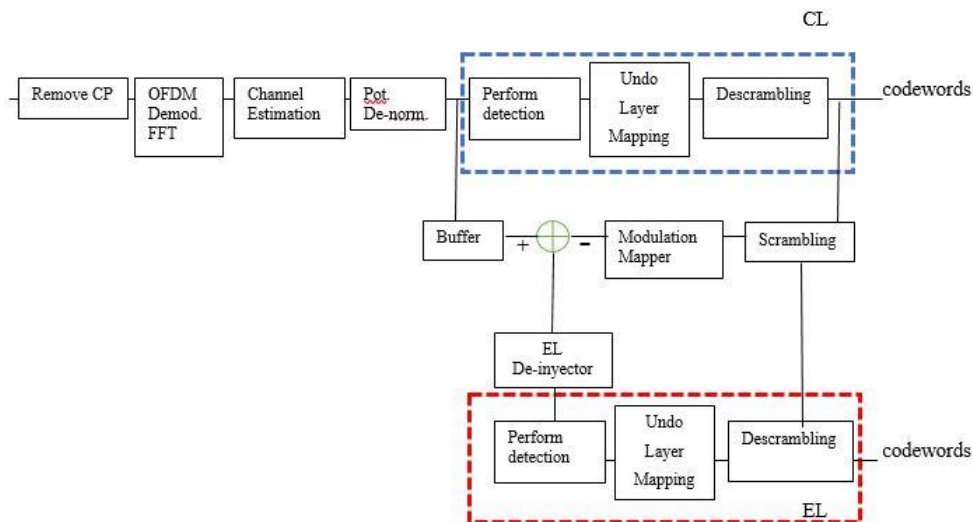


Fig. 21 Bloques de NOMA adaptados en recepción.

Para la capa CL, la parte de recepción se realiza en la función `LTE_RX`, en la cual se remueve el CP, realiza una demodulación, una FFT, y se almacena en la variable `rx_user_symbols_c`. Se realiza una estimación del canal y del ruido mediante la función `LTE_channel_estimator`, con un método de estimación PERFECT. El bloque de Perform detection, se realiza mediante la función `LTE_detecting`, dentro de la cual está la función `LTE_detect_SIxO`, en la cual se realiza la de-normalización y la utilización del demapper SSD.

La de-normalización se realiza de la siguiente manera:

$$g=10^{(-LTE\_params.scheduler\_EL.Iny\_level/20)}$$

$$symbol\_alphabet=symbol\_alphabet./sqrt(1+g^2)$$

En la función `LTE_softsphere` se calcula los LLR y se almacena en la variable `LLR_SD`. La capa CL puede ser decodificada directamente tratando a la capa EL como un ruido adicional.

Se deshace el mapeado de capas. Después se realiza el desentrelazado mediante la función `LLR_SS_descrambled`, Finalmente para obtener las *codewords*, se utiliza la función `LTE_rx_DLSCH_decode`, dentro de esta función se aplica un *rate de-matching*, *turbo decoding* mediante las funciones `LTE_rx_turbo_rate_matcher`, `LTE_rx_turbo_decode` correspondientemente. Su resultado se guarda en la variable `UE_output(uu).rx_data_bits`.

Como se observó en el apartado II.2. la capa EL se calcula mediante una técnica de cancelación, por lo tanto, para la cancelación de la capa CL, primero se realiza una reconstrucción de esta capa.

Para la reconstrucción de la capa CL se utiliza los datos de la variable `UE_output(uu).rx_data_bits` para aplicar algunos bloques de transmisión, pero ahora se lo realiza en la función `LTE_TX_CL_cancellation`. En esta función se realiza la codificación de los bits de entrada mediante la función `LTE_tx_DLSCCH_encode`, dentro de esta función se realiza el cálculo de los CRC, se aplica el *turbo encoder*, luego se aplica el *rate matching*, después se realiza el *scrambling*, y por último se realiza la modulación de estos bits aleatorizados. Los símbolos complejos obtenidos se almacenan en la variable `tx_user_symbols_c`, a estos símbolos complejos se aplica el nivel de potencia a la que fue transmitida por primera vez.

$$gtx=10^{-(LTE\_params.scheduler\_EL.Iny\_level/20)};$$

$$tx\_user\_symbols\_c=tx\_user\_symbols\_c./\sqrt{1+gtx^2};$$

Ahora se procede a realizar la cancelación de la capa CL para obtener la capa EL en la función `LTE_sim_main_single` según la ecuación (5) del capítulo II.1.2.2:

$$tx\_user\_symbols\_EL=rx\_user\_symbols\_c-tx\_user\_symbols\_c.*H\_est\_user$$

Una vez obtenido la capa EL se procede realizar los bloques de recepción en la función `LTE_RX_EL`, se realiza el *perform detection* en la función `LTE_detecting_EL`, dentro de la cual está la función `LTE_detect_SlXO_EL`, en la cual se realiza la de-normalización y la utilización del demapper SSD.

La de-normalización se realiza de la siguiente manera:

$$g=10^{-(LTE\_params.scheduler\_EL.Iny\_level/20)}$$

$$symbol\_alphabet = symbol\_alphabet.*\sqrt{g^2/(1+g^2)};$$

En la función `LTE_softsphere` se calcula los LLR y se almacena en la variable `LLR_SD`.

Se deshace el mapeado de capas. Después se realiza el desentrelazado mediante la función `LLR_SS_descrambled`, Finalmente para obtener las *codewords*, se utiliza la función `LTE_rx_DLSCCH_decode`, dentro de esta función se aplica un *rate de-matching*, *turbo decoding* mediante las funciones `LTE_rx_turbo_rate_matcher`, `LTE_rx_turbo_decode` correspondientemente. Su resultado se guarda en la variable `UE_output(uu)_EL.rx_data_bits`.

### III.6.3 INTRODUCCIÓN DEL DEMAPPER ML.

El demapper que utiliza por defecto el simulador es el SSD (Soft Sphere Decoder), de éste demapper no hay mucha información ya que el código fuente de esta parte de la programación está restringido en el simulador. Pero tal y como se muestra en la primera sección de resultados, el demapper no va a ser válido en el sistema NOMA. Por lo tanto, se requirió la incorporación del demapper ML.

El demapper ML minimiza la probabilidad de error de los bits de código transmitidos y se expresa en forma de LLR. A partir del vector de símbolos recibidos  $y$ , y del vector de canales  $H$ , se calcula los LLR (log-likelihood ratio) para todos los bits codificados [17]. Para el cálculo de LLR  $\Lambda_j$ , se

calcula un número total de  $N$  distancias entre el símbolo recibido  $y$  y todos los símbolos de constelación  $x$ .

$$\Lambda_l = \log \frac{\sum_{x \in X_l^1} \exp\left(-\frac{|y-Hx|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{x \in X_l^0} \exp\left(-\frac{|y-Hx|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

Donde  $\sigma^2$  es la varianza de ruido.

En el apartado III.6.3.1 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, y lo que cambiaría en recepción sería lo siguiente:

Para la capa CL, se realiza el mismo procedimiento descrito en el apartado III.6.2, lo que cambia es el cálculo de los LLR, este cálculo se realiza en la función `llr_demapper_opt`, se utiliza la ecuación (6). Donde `rx_user_symbols` representa  $y$ , `symbol_alphabet` representa  $x$ , y `H_est_user` representa  $H$ , `noise` representa el ruido  $\sigma$ .

Para el cálculo del ruido se utiliza las siguientes líneas de comando en el simulador:

```
sigma_n2 = 10^(-SNR/10)
g=10^(-LTE_params.scheduler_EL.Iny_level/20)
sigma_n2=sigma_n2+((g^2)/(1+g^2))
noise=ones(length(rx_user_symbols(ind,:)),1).*sigma_n2
```

Para la capa EL, se realiza el mismo procedimiento descrito en el apartado III.6.2, lo que cambia es el cálculo de los LLR, este cálculo se realiza en la función `llr_demapper_opt`, se utiliza la ecuación (6). Donde `rx_user_symbols_EL` representa  $y$ , `symbol_alphabet` representa  $x$ , `H_est_user` representa  $x$ , `noise` representa el ruido  $\sigma$ .

Para el cálculo del ruido se utiliza las siguientes líneas de comando en el simulador:

```
sigma_n2 = 10^(-SNR/10)
noise=ones(length(rx_user_symbols_EL(ind,:)),1).*sigma_n2
```

### III.6.3.1 VALIDACIÓN DEL DEMAPPER ML

En la Fig. 22, se puede 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, ya que los resultados son iguales al demapper SSD. Los resultados de la Fig. 22 del demapper SSD se corroboran en [13].

Posteriormente se realizó pruebas utilizando el canal PedB. En la Fig. 23, se puede observar que el demapper ML es válido para ser utilizado en un sistema FDM/TDM, ya que los resultados son iguales al demapper SSD. Los resultados de la Fig. 23 del demapper SSD se corroboran en [18] en el capítulo 8.2.2.

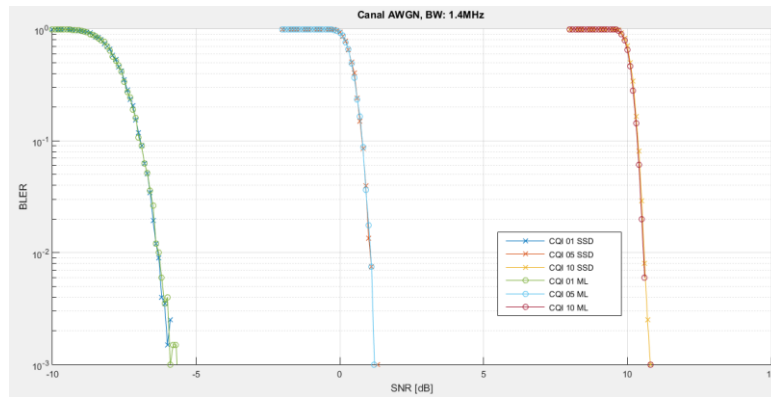


Fig. 22 Demappers ML, SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal AWGN

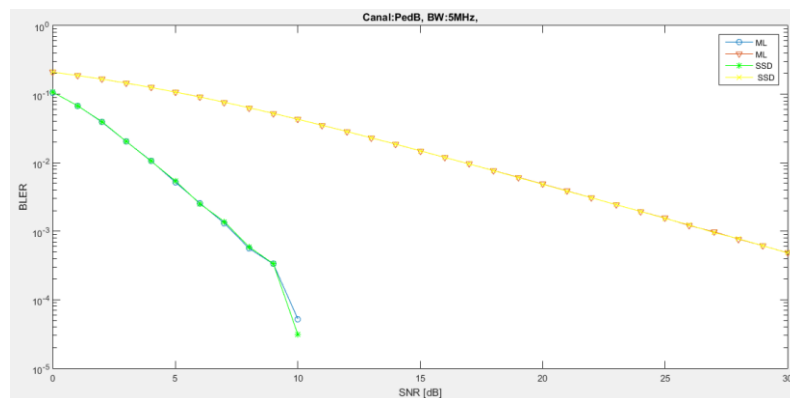


Fig. 23 Demappers ML, SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal PedB

### III.6.4 CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS.

Las configuraciones básicas utilizadas se muestran en la Tabla.4.

Parámetros	Valor
Tipo de simulación	SUSISO
Número de usuarios	1
Ancho de Banda	1,4MHz
Prefijo cíclico	Normal
Transmisión HARQ	no
Uplink delay	no
Tipo de canal	AWGN/Ped-B
Estimación de canal	PERFECT
Filtración	Block Fading
Receptor	ML
Número de frames	2000
Inyection Level (IL)	-4dB
Capa CL	CQI: 1, 2, 3, 4, 5, 6
Capa EL	CQI: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Tabla 7 Configuraciones básicas

## IV. RESULTADOS

### IV.1. ESTUDIO DE LOS DEMAPPERS ML, SSD EN EL SISTEMA NOMA

Tal y como se ha dicho en teoría, en un sistema NOMA la capa EL se considera como un ruido adicional. Mediante los resultados de simulaciones de medidas de BLER de la Fig. 24 y Fig. 25, la sensación que brinda el demapper SSD es que se abstrae de la potencia de ruido del sistema NOMA.

No obstante, para validar que los resultados son correctos se usa las ecuaciones de aproximación teórica del SNR según [19].

$$SNR_{CL\_teórico} = SNR_{CL\_ORIGINAL} - 10\log_{10} \left( 1 - 10^{\frac{SNR_{CL\_ORIGINAL} + \Delta}{10}} \right) + 10\log_{10} \left( 1 + 10^{\frac{\Delta}{10}} \right) \quad (7)$$

$$SNR_{EL\_teórico} = SNR_{EL\_ORIGINAL} - \Delta + 10\log_{10} \left( 1 + 10^{\frac{\Delta}{10}} \right) \quad (8)$$

Donde  $SNR_{CL\_ORIGINAL}$ ,  $SNR_{EL\_ORIGINAL}$  podemos encontrar en la Fig. 24 y Fig. 25, para los CQI 01, 05, 10 y 15 son -5.9 dB y 1.2 dB correspondientemente, y  $\Delta$  es el nivel de inyección, que en este caso es igual a -4 dB. En la Tabla.8 se muestra los resultados de los cálculos de acuerdo con las ecuaciones (7), (8), y los resultados de acuerdo con las Fig. 24, Fig. 25 en un canal AWGN.

Como podemos observar en la Tabla. 8 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 gráficos del demapper SSD son muy distintos. En la Fig. 25 para la capa EL, la curva de BLER utilizando el demapper SSD no cae, 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 (Maximun-Likelihood).

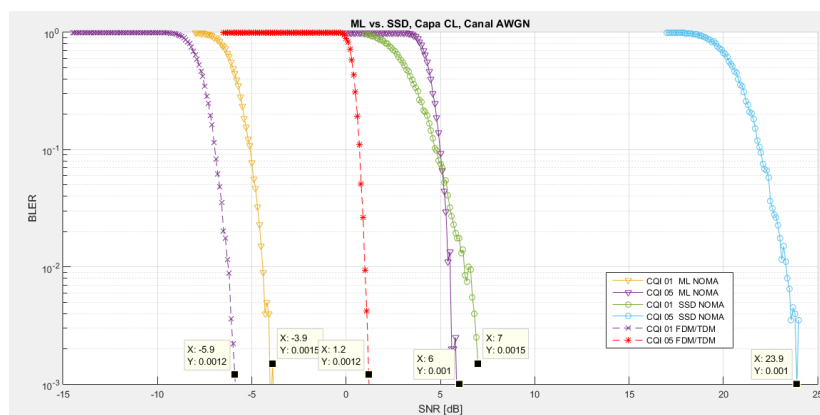


Fig. 24 Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa CL, en un canal AWGN

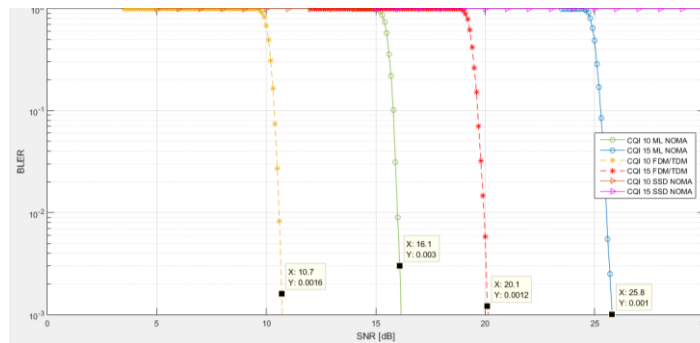


Fig. 25 Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa EL, en un canal AWGN.

		Resultados Gráficos		Resultados Teóricos
		Demapper SSD	Demapper ML	
Capa CL	CQI 01	7 dB	-3.9dB	-3.97 dB
	CQI 05	23.9 dB	6 dB	5.89 dB
Capa EL	CQI 10	--	16.1 dB	16.1 dB
	CQI 15	--	25.8 dB	25.46 dB

Tabla 8 Demapper SSD vs ML

En la Fig. 26 se muestra medidas de BLER utilizando los demapper ML y SSD en un canal PedB, en esta figura se puede observar resultados parecidos al de la Fig. 24, se puede ver que el demapper SSD va mal en el sistema NOMA por el problema antes mencionado, y el demapper ML tiene un buen funcionamiento en un sistema NOMA.

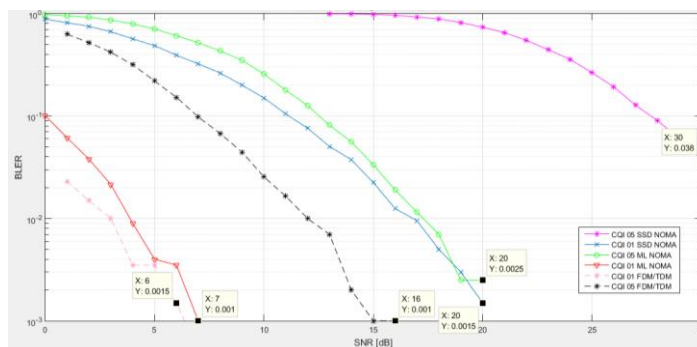


Fig. 26 Demapper ML vs SSD en NOMA, en un canal PedB.

#### IV.2. IMPACTO DE LOS PARAMETROS CONFIGURABLES DE NOMA.

Tal y como se ha ido describiendo el sistema NOMA por tanto se configurará de acuerdo con 3 parámetros: CQI de la capa CL, CQI de la capa EL, y el nivel de inyección. Para realizar el estudio de los parámetros por separado se ha fijado los otros 2 a un determinado valor.

##### IV.2.1. 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 de arriba, mientras que para la capa EL se emplea un CQI 10.

En la Fig.27 se observa que, al utilizar un nivel de inyección de 2dB para la capa CL, la curva de NOMA está muy alejado de la curva unicapa, y conforme aumenta el nivel de inyección, la curva de NOMA se va acercando a la curva unicapa.

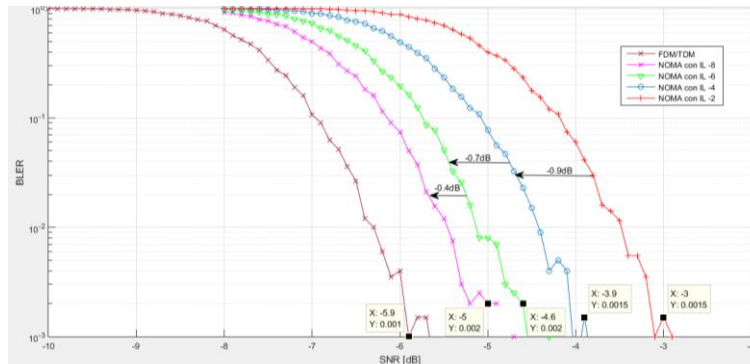


Fig. 27 Impacto del nivel de inyección en la capa CL

En la Fig.28 se observar 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.

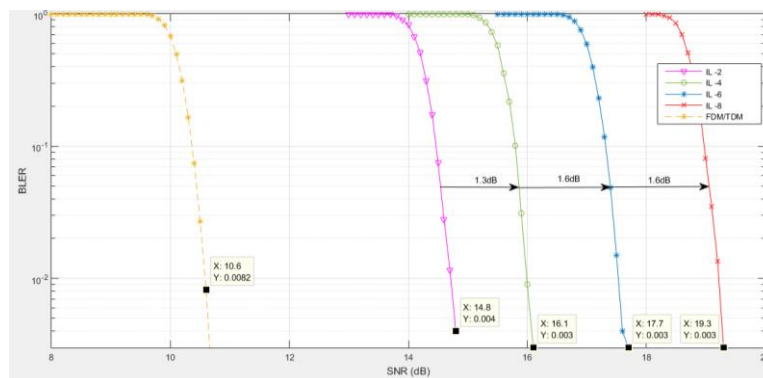


Fig. 28 Impacto del nivel de inyección en la capa EL

Por tanto, en la Tabla.9 se muestra las ganancias y pérdidas en la SNR umbral que se obtiene al cambiar el nivel de inyección en las capas CL y EL. Para la capa CL la diferencia de rendimiento se nota un mayor cambio, mientras que 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.

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

Tabla 9 Ganancias y pérdidas por efecto del nivel de inyección

#### IV.2.2 CQI DE LA CAPA CL.

Una vez evaluado el impacto del nivel de inyección, se estudia cómo afecta la robustez de la capa CL con diferentes CQIs. Para ello se ha fijado el CQI 10 de la capa EL y  $4\text{dB}$  del nivel de inyección.

Las curvas de NOMA de los CQI 01, 03, 05 en comparación con las curvas unicapa de los CQI 01, 03, 05 del sistema unicapa, aumentan  $2\text{dB}$ ,  $3.6\text{dB}$ ,  $4.8\text{dB}$ , de SNR correspondientemente, tal y como se observa en la Fig. 29.

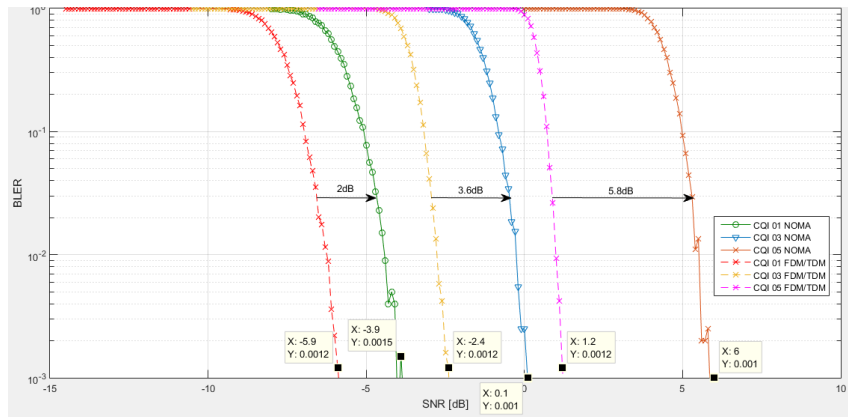


Fig. 29 Impacto del CQI de la capa CL

Por tanto, el hecho de utilizar una CQI robusto hará que el rendimiento empeore menos, si se utiliza un CQI poco robusto hará que el rendimiento empeore mucho y afectara a la capa EL. Por lo tanto, se comprueba que el rendimiento también depende de la robustez de la capa.

#### IV.2.3 CQI DE LA CAPA EL.

Por último, se evalúa el rendimiento de la capa CL con diferentes CQIs. Para ello se ha fijado el CQI 01 de la capa CL y  $4\text{dB}$  del nivel de inyección.

Las curvas de NOMA de los CQI 07, 10, 15 en comparación con las curvas unicapa de los CQI 07, 10, 15 del sistema unicapa, aumentan  $5.4\text{dB}$ ,  $5.4\text{dB}$ ,  $5.7\text{dB}$ , de SNR correspondientemente, tal y como se observa en la Fig. 30.

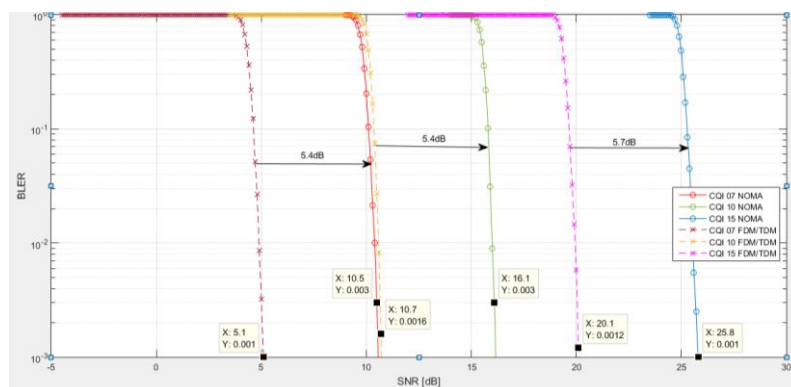


Fig. 30 Impacto del CQI de la capa EL



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 debería mantener constante la diferencia del rendimiento entre NOMA y el sistema unicapa.

### IV.3. NOMA VERSUS 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 evalúa distintas combinaciones de CQIs que proporcionan diferentes tasas de transmisión en servicios destinados a recepción móvil y fija.

En la Fig. 31 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 utilizaría los CQIs 01 y 07 respectivamente. Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizaría los CQIs {02, 03, 04} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo correspondientemente, mientras que para el servicio fijo se utilizaría los CQIs {11, 10, 09} que tienen asignado el {42%, 60%, 70%} de tiempo respectivamente.

En la Fig. 31 se observa que la curva de NOMA del servicio móvil

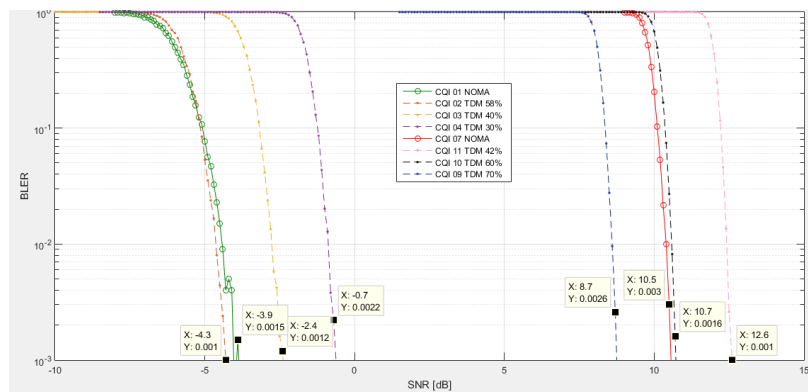


Fig. 31 Tasas de transmisión BAJAS de los servicios móviles y fijos.

En la Fig. 32 se muestra una combinación de los servicios móviles y fijos con una tasa de transmisión MEDIA. Para garantizar una tasa de transmisiones en NOMA de 0.234 bps/Hz del servicio móvil y de 2.4 bps/Hz del servicio fijo, se utilizaría los CQIs 02 y 09 respectivamente. Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizaría los CQIs {03, 04, 05} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo correspondientemente, 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 gráfica se observa que NOMA va mejor que TDM.

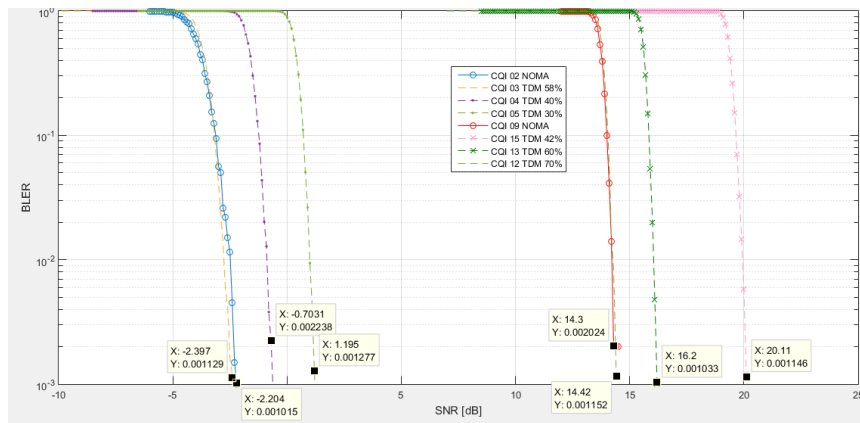


Fig. 32 Tasas de transmisión MEDIAS de los servicios móviles y fijos.

En la Fig. 33 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 utilizaría los CQIs 03 y 12 respectivamente. Para mantener esas tasas de transmisión en el sistema TDM, en el servicio móvil se utilizaría los CQIs {04, 05, 06} que tienen asignado el {58%, 40%, 30%} de tiempo correspondientemente, mientras que para el servicio fijo se utilizaría 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, ya que en la reléase 8 sólo proporciona 15 CQIs.

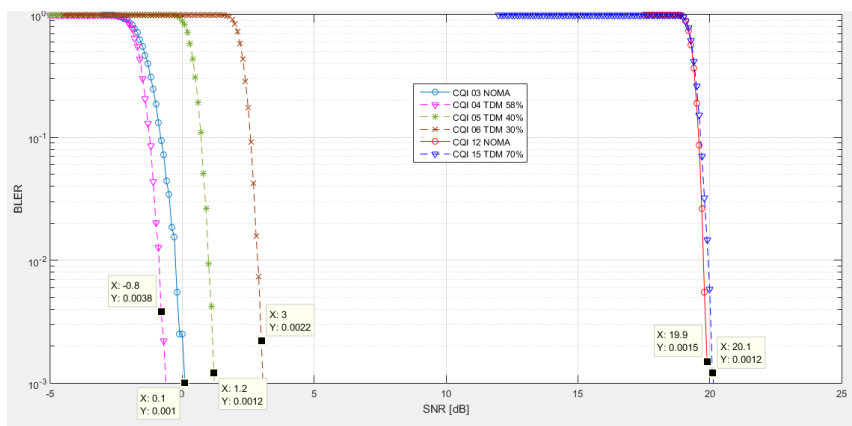


Fig. 33 Tasas de transmisión ALTAS de los servicios móviles y fijos.

La Tabla.10 se muestran 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 transmisión, y las órdenes de modulación. Para la Tabla. 10 se utilizó canal un AWGN tanto para el servicio móvil como para el servicio fijo. 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.

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 16 QAM 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 10 NOMA vs TDM en un canal AWGN

Como se muestra en la Tabla 11, 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 de 1.42 dB a 5.64 dB sobre TDM en el canal AWGN.

Móvil	Móvil 58% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0,23 bps/Hz	-0,33	1,57	3,27
0,377 bps/Hz	-0,25	1,45	3,35
0,6016 bps/Hz	-0,89	1,01	2,81
Fijo	Fijo 42% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
2,4 bps/Hz	2,05	0,15	-1,85
3,32 bps/Hz	5,86	2,05	0,25
4,52 bps/Hz	N/A	1,96	0,2
5,55 bps/Hz	N/A	N/A	0,16

Tabla 11 Ganancia de Noma sobre TDM en un canal AWGN

#### IV.3.1 COMPARACIÓN DE NOMA CON ATSC 3.0.

Las ganancias de NOMA en LTE de la Tabla. 11 se compara con las ganancias de NOMA en ATSC 3.0 de la Tabla.12, 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 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.

Móvil	Móvil 58% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0,15bps/Hz	-0,33	1,57	3,27
0,23bps/Hz	-0,25	1,45	3,35
0,377bps/Hz	-0,89	1,01	2,81
Fijo	Fijo 42% tiempo	Fijo 60% tiempo	Fijo 70% tiempo
1,47bps/Hz	2,05	0,15	-1,85
2,4bps/Hz	5,86	2,05	0,25
3,32bps/Hz	N/A	1,96	0,2
3,9bps/Hz	N/A	N/A	0,16

Tabla 12 Ganancia de NOMA sobre TDM en un canal AWGN en LTE

Móvil	Móvil 55% tiempo	Móvil 40% tiempo	Móvil 30% tiempo
0.34 bps/Hz	1.6dB	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
2.5 bps/Hz	4.4 dB	-0.1 dB	-1.5 dB
3.6 bps/Hz	7.1 dB	2.0 dB	-1.3 dB
4.3 bps/Hz	N/A	2.3 dB	-0.7 dB
5.27 bps/Hz	N/A	N/A	1.2 dB

Tabla 13 Ganancia de NOMA sobre TDM en un canal AWGN en ATSC 3.0 [5]

#### IV.4. 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 observaba la SNR que requerían, en esta última sección se hace el proceso contrario, es decir, fijando la SNR se vería qué tasas proporcionan.

Fijando un umbral de SNR constante de 1.2dB correspondiente al servicio móvil, y diferentes umbrales de SNR de 10.7dB y 20.01dB correspondiente al servicio fijo. Esto da lugar a obtener combinaciones de CQIs, de niveles de inyección, estas combinaciones se muestran en la Tabla.14.

		LTE (eMBMS)	
		SNR <sub>m</sub> =1,2dB SNR <sub>f</sub> =10,7dB	SNR <sub>m</sub> =1,2dB SNR <sub>f</sub> =20,01dB
1	CL=CQI 05 capacidad=0,877bps/Hz	CL=CQI 05 capacidad=0,877bps/Hz	
	EL----	EL----	
3 (IL=-6,1dB)	CL=CQI 04 capacidad=0,6bps/Hz	CL=CQI 04 capacidad=0,6bps/Hz	
	EL=CQI 06 capacidad=1,17bps/Hz	EL=CQI 11 capacidad=3,32bps/Hz	
4 (IL=-2,5dB)	CL=CQI 03 capacidad=0,377bps/Hz	CL=CQI 03 capacidad=0,377bps/Hz	
	EL=CQI 08 capacidad=1,91bps/Hz	EL=CQI 13 capacidad=4,5bps/Hz	
2	CL-----	CL-----	
	EL=CQI 10, capacidad= 2,7bps/Hz	EL=CQI 15, capacidad= 5,5bps/Hz	

Tabla 14 Capacidades de servicios móviles y fijos en LTE

La Fig. 34a se obtiene mediante las combinaciones de la Tabla.14, se compara la velocidad de datos alcanzable de los servicios móviles y fijos de los sistemas NOMA y TDM/FDM. 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. 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. Como se observa en la Fig. 34a. para el caso de 0.6bps/Hz del servicio móvil, se puede conseguir un aumento de 1.17bps/Hz a 3.3 bps/Hz.

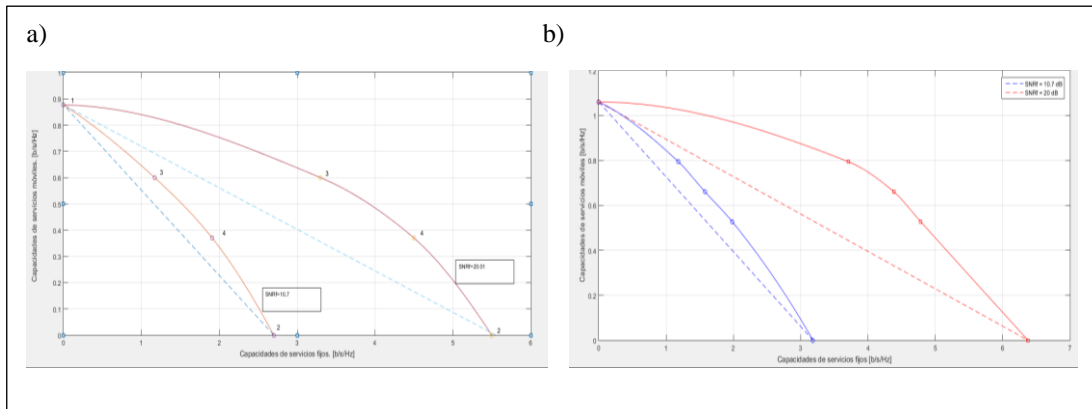


Fig. 34 a) Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en LTE. b) Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en ATSC 3.0.

La Fig.34b se obtiene de las combinaciones realizadas en la Tabla. 15.

		ATSC 3.0	
		SNR <sub>m</sub> =1,2dB SNR <sub>f</sub> =10,7dB	SNR <sub>m</sub> =1,2dB SNR <sub>f</sub> =20,01dB
1	CL=QPSK 8/15 capacidad=1.6bps/Hz	CL=QPSK 8/15 capacidad=1.6bps/Hz	CL=QPSK 8/15 capacidad=1.6bps/Hz
	EL----	EL----	EL----
3 (IL=-6,7dB)	CL=QPSK6/15 capacidad=0,79bps/Hz	CL=QPSK6/15 capacidad=0,79bps/Hz	CL=QPSK6/15 capacidad=0,79bps/Hz
	EL=64NUC3/15 capacidad=1,82bps/Hz	EL=256NUC7/15 capacidad=3,71bps/Hz	EL=256NUC7/15 capacidad=3,71bps/Hz
4 (IL=-3,9dB)	CL=QPSK5/15 capacidad=0,6bps/Hz	CL=QPSK5/15 capacidad=0,6bps/Hz	CL=QPSK5/15 capacidad=0,6bps/Hz
	EL=256NUC3/15 capacidad=1,57bps/Hz	EL=64NUC11/15 capacidad=4,38bps/Hz	EL=64NUC11/15 capacidad=4,38bps/Hz
5 (IL=-17dB)	CL=QPSK5/15 capacidad=0,5bps/Hz	CL=QPSK5/15 capacidad=0,5bps/Hz	CL=QPSK5/15 capacidad=0,5bps/Hz
	EL=256NUC3/15 capacidad=1,92bps/Hz	EL=64NUC12/15 capacidad=4,78bps/Hz	EL=64NUC12/15 capacidad=4,78bps/Hz
2	CL--	CL--	CL--
	EL=64NUC8/15 capacidad=3.18bps/Hz	EL=64NUC8/15 capacidad=3.18bps/Hz	EL=64NUC8/15 capacidad=3.18bps/Hz

Tabla 15 Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en ATSC 3.0.

Los resultados de LTE se compara con los de ATSC3.0 de la Fig. 34b. Fijando una tasa media de 0.6 del servicio móvil, se consigue una tasa fija de 1.17bps/Hz en LTE mientras que en ATSC 3.0 se consigue una tasa fija de 1.82bps/Hz para una SNR<sub>m</sub> de 1.2 dB y SNR<sub>f</sub> de 10.7dB. En ATSC 3.0 se consigue una tasa de 4.5bps/Hz mientras que en LTE se consigue una tasa de 3.3bps/Hz para una SNR<sub>f</sub> de 20.01 dB.

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

## V. CONCLUSIONES

En esta tesina, 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 (capa CL) para un sistema NOMA es el mismo que para los sistemas unicapa tradicionales, mientras que para el receptor fijo (capa EL) capaz de decodificar ambas capas, añade una complejidad en términos de procesamiento de señal y requerimiento de memoria.

Se ha demostrado mediante resultados teóricos y resultados de simulaciones, que el demapper SSD no es factible para el sistema NOMA, ya que la sensación que brindaron los resultados es que el demapper SSD no toma en cuenta el ruido de potencia del sistema. Como este ruido cambia en NOMA, se incorporó el demapper ML, este demapper fue validado mediante simulaciones y resultados teóricos para el resto de simulaciones en el sistema NOMA.

A partir de resultados de simulaciones, se ha evaluado el impacto que tiene cada parámetro de NOMA, y se ha visto que:

Los resultados tienen un mayor cambio para la capa CL, mientras que 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.

Se ha comprobado que el rendimiento de NOMA también depende de la robustez de la capa.

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

Se ha comprobado que NOMA va mejor que TDM como en el caso particular que utiliza una tasa BAJA (0.15 bps/Hz) en el receptor móvil y una tasa MEDIA (2.4 bps/Hz) en el receptor fijo, se consiguen ganancias de  $3.35dB$  y  $0.25dB$ .

Se ha realizado una comparación con ATSC 3.0 y se observó que ATSC 3.0 va mejor, esto se debe principalmente a que la codificación LDPC es más eficiente respecto al turbo código de LTE.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Wu, B. Rong, K. Salehian, and G. Gagnon, "Cloud transmission: A new spectrum-reuse friendly digital terrestrial broadcasting transmission system," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 58, no. 3, pp. 329–337, Sep. 2012.
- [2] J. Montalban et al., "Cloud transmission: System performance and application scenarios," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 60, no. 2, pp. 170–184, Jun. 2014.
- [3] L. Zhang, W. Li, Y. Wu, X. Wang, S-I Park, HM Kim, J-Y Lee, P. Angueira, and J. Montalban, "Layered Division Multiplexing: Theory and Practice," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 62, no. 1, March 2016.
- [4] "A/322 ATSC Candidate Standard – Physical Layer Protocol," Doc. S32-230r21, 6 junio 2017. <https://www.atsc.org/wp-content/uploads/2016/10/A322-2017a-Physical-Layer-Protocol.pdf>.
- [5] Sung Ik Park; Jae-Young Lee; Seho Myoung; Liang Zhang; Yiyan Wu; Jon Montalbán; Sunhyoung Kwon; Bo-Mi Lim; Pablo Angueira; Heung Mook Kim; Namho Hur; Jeongchang Kim "Low Complexity Layered Division Multiplexing for ATSC 3.0" *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 62, no. 1, March 2016.
- [6] 3GPP TS 36.211 v10.6.0, 3 rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 10. Diciembre 2012).
- [7] 3GPP TS 36.213 v8.8.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures.
- [8] 3GPP TS 36.212: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding".
- [9] F. Hartung, U. Horn, J. Huschke, M. Kampmann, T. Lohmar, y M. Lundevall, "Delivery of Broadcast Services in 3G Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 53, no. 1, pp. 188-199, marzo 2007.
- [10] J. Huschke y M.-A. Phan, "An Overview of the Cellular Broadcasting Technology eMBMS in LTE," David Gómez-Barquero (ed.), *Next Generation Mobile Broadcasting*, CRC Press, 2013.
- [11] A. Shokrollahi, "Raptor Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2551-2567, Junio 2006.
- [12] Eduardo Garro, Jordi Joan Gimenez, Sung Ik Park, Dvis Gomez Barquero, " Scattered Pilot Performance and Optimization for ATSC 3.0", *IEE Transactions on Broadcasting*, Volume: 63, Issue: 1, Pages: 282 - 292,Year: 2017.
- [13] Vienna LTE Simulators LTE-A Link Level Simulator Documentation, v1.4 Q2-2016, Institute of Telecommunications Vienna University of Technology, Austria Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria Web: <http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator>.
- [14] C. Mehlh'uhner, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," in *Proc. of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*, Glasgow, Scotland, Aug. 2009.

- [15] I. Free Software Foundation, "GNU lesser general public license, version 2.1." [Online]. Available: <http://www.gnu.org/licenses/lgpl-2.1.html>.
- [16] M. I. of Technology, "MIT license." [Online]. Available: <http://www.opensource.org/licenses/mit-license.php>.
- [17] PhD. Manuel Fuentes Muela, "Non-Uniform Constellations for Next-Generation Digital Terrestrial Broadcast Systems", departamento de Telecomunicaciones Universidad Politécnica de Valencia, Junio 2017.
- [18] Markus Rupp, Stefan Schwarz, Martin Taranetz, " Vienna LTE Simulators LTE-A Link Level Simulator Documentation ", Institute of Telecommunications Vienna University of Technology, Austria.
- [19] Jon Montalbán; Liang Zhang; Unai Gil; Yiyang Wu; Itziar Angulo; Khalil Salehian; Sung-Ik Park; Bo Rong, Wei Li; Heung Mook Kim; Pablo Angueira; Manuel Vélez, "Cloud Transmission: System Performance and Application Scenarios" IEEE Transactions on Broadcasting, Volume: 60, Issue: 2 Pages: 170 - 184, Year: 2014.