

NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS (NOMA) EN SISTEMAS LONG TERM EVOLUTION (LTE)

Néstor Augusto Estrada Brito
Juan Carlos Santillán Lima
Santiago Israel Logroño Naranjo
José Hernan Negrete Costales

**EVALUACIÓN DEL
RENDIMIENTO DE ACCESO
MÚLTIPLE NO-ORTOGONAL
(NOMA) EN SISTEMAS LTE
(LONG TERM EVOLUTION)**



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACCESO MÚLTIPLE NO-ORTOGONAL (NOMA) EN SISTEMAS LTE (LONG TERM EVOLUTION)

**Néstor Augusto Estrada Brito
Juan Carlos Santillán Lima
Santiago Israel Logroño Naranjo
José Hernán Negrete Costales**



AUTORES:

Néstor Augusto Estrada Brito

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur
km 1 1/2, (EC060155), Riobamba, Ecuador

nestor.estrada@epoch.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0002-4100-7351>

Juan Carlos Santillán Lima

LEICI (Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento
de Señales), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
(UNLP), Calle 48 y 116, CC 91 (1900), La Plata, Argentina

Doctorado en Ciencias Informáticas, Facultad de Informática, Universidad
Nacional de La Plata (UNLP), Calle 50 y 120, CC 1900, La Plata, Argentina
Becario SENESCYT, Ecuador.

juankasl@outlook.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5812-7766>

Santiago Israel Logroño Naranjo

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur
km 1 1/2, (EC060155), Riobamba, Ecuador

israel.logronio@epoch.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0002-1205-3017>

José Hernán Negrete Costales

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur
km 1 1/2, (EC060155), Riobamba, Ecuador

jose.negrete@epoch.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0002-2678-761X>

Primera Edición, Mayo 2022



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACCESO MÚLTIPLE NO-ORTOGONAL (NOMA) EN SISTEMAS LTE (LONG TERM EVOLUTION)

ISBN: 978-9942-8986-3-0

DOI: <https://doi.org/10.55204/i2D.4>

Editado por:

Sello editorial: © Editorial I2D Investigación, Innovación y Desarrollo
978-9942-8986

ISBN Editorial: 114748

Nº Radicación:

Editorial: © SCALLMO Educación-Formación y Capacitación
Colombia 20-55 y 5 de Junio
Dirección de Publicaciones Científicas
Riobamba, Ecuador

Teléfono: 593 984 992306

Código Postal: EC0600111

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego (*peer review*)

Corrección y diseño

Editorial I2D Investigación, Innovación y Desarrollo

Diseñador Gráfico: José Luis Santillán Lima

Diseño, Montaje y producción editorial

Editorial I2D Investigación, Innovación y Desarrollo

Diseñador Gráfico: Santillán Lima, José Luis

Director del equipo editorial

Molina Granja, Fernando Tiverio

Hecho en Ecuador

Made in Ecuador

Resumen

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 a 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. Así también se hace una revisión de las aplicaciones de la telefonía celular, principalmente de LTE en la seguridad industrial.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	Una mirada teorica a Long Term Evolution	4
	II.1 LTE (LONG TERM EVOLUTION).....	4
	II.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES	4
	II.1.2 ESTRUCTURA DE LA TRAMA.....	5
	II.1.3 LTE EN DOWNLINK	7
	II.1.4 EMBMS (ENHANCED MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICES)	13
III.	LTE (Long Term Evolution).....	22
	III.1 ESTANDARIZACIÓN DE LTE	22
	III.2 ARQUITECTURA LTE	23
	III.3. INTERFAZ AIRE.....	26
	III.4 EL ESQUEMA DE ACCESO	29
	III.4 CANALES UTILIZADOS EN LTE.....	31
	III.5 MODOS DE COMUNICACIÓN	35
	IV.6 SISTEMAS MULTIANTENA	36
IV.	LTE-A.....	40
	IV.1 AGREGADO DE PORTADORAS	42
	IV.2 MULTIPLEXADO ESPACIAL AVANZADO	44
	IV.4 MIMO	44
	IV.4 COORDINACIÓN MULTIPUNTO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	46
	IV.5 REDES HETEROGENIAS	48
V.	Comparativa LTE y LTE-A	51
	V.1 CARACTERÍSTICAS DE LTE Y LTE-A	52
	V.2 LTE - ADVANCE RESPECTO A LTE	53
	V.3 NOMA	55
VI.	SIMULACIÓN Y TECNICAS	62

VI.1. SIMULADOR DE VIENNA LTE A NIVEL DE ENLACE	62
.....	62
VI.1.1 TRANSMISIÓN.....	62
VI.1.2. CANAL.....	66
III.1.3. RECEPCIÓN.....	66
VI.1.4. CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS... 67	67
VI.2. ADAPTACIÓN DE NOMA AL SIMULADOR DE VIENNA.....	68
VI.2.1 TRANSMISIÓN.....	68
VI.2.2 RECEPCIÓN.....	77
VI.2.3 INTRODUCCIÓN DEL DEMAPPER ML.....	82
VI.2.4 CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS... 85	85
VII. ESTUDIO DE LOS DEMAPPERS.....	87
VII.1. ESTUDIO DE LOS DEMAPPERS ML, SSD EN EL SISTEMA NOMA.....	87
VII.2. IMPACTO DE LOS PARAMETROS CONFIGURABLES DE NOMA.....	90
VII.2.1. NIVEL DE INYECCIÓN.....	90
VI.2.3 CQI DE LA CAPA EL.....	94
VII.3. NOMA VERSUS TDM EN UN CANAL AWGN.....	95
VII.3.1 COMPARACIÓN DE NOMA CON ATSC 3.0.....	100
VII.4. CAPACIDADES DE SERVICIOS ALCANZABLES CON DIFERENTES UMBRALES SNR DE SERVICIO FIJO.....	102
VIII. LTE, IoT En La Seguridad Industrial.....	106
VIII.1. IOT.....	106
VIII.1.1. SENSORES Y ACTUADORES.....	107
VIII.2. SEGURIDAD INDUSTRIAL.....	110
VIII.3. IOT Y LTE.....	112
VIII.4. APLICACIONES.....	114
IX. CONCLUSIONES.....	119
BIBLIOGRAFÍA.....	121

LOS AUTORES	127
NÉSTOR AUGUSTO ESTRADA BRITO	127
JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA	128
SANTIAGO ISRAEL LOGROÑO NARANJO.....	129
JOSÉ HERNÁN NEGRETE COSTALES	130

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. UNA MIRADA TEORICA A LONG TERM EVOLUTION

II.1 LTE (LONG TERM EVOLUTION)

El gran avance de las tecnologías inalámbricas buscan eficiencia en sus redes, reduciendo costos y mejorando calidad de servicio; por lo que LTE presenta muchas mejoras frente a otras tecnologías en lo concerniente a velocidad de transmisión de datos, eficiencia del espectro, baja latencia, etc., con lo que se da apertura a una gran variedad de nuevos servicios como video streaming.

"LTE presupone una arquitectura de red totalmente basada en Protocolo de Internet (IP) y está diseñada para dar soporte a voz en el dominio de los paquetes." [1]. Esto representa la verdadera evolución de las tecnologías celulares al ofrecer una mayor calidad en los servicios de voz.

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 existan tales restricciones en FDD de dúplex completo [6].

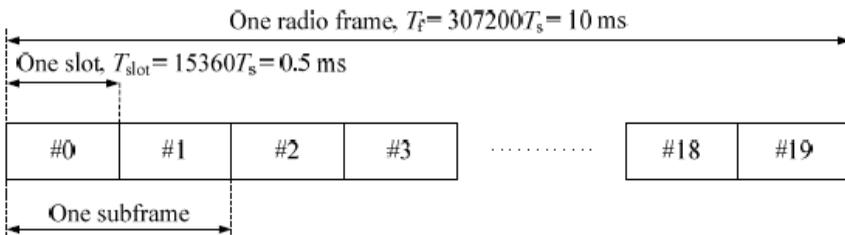


Fig. 1 Estructura de la Trama tipo 1 [6].

-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].

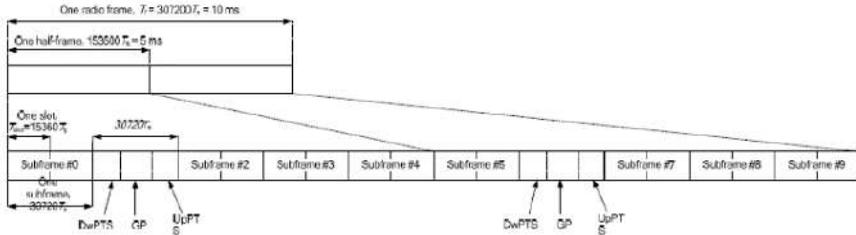


Fig. 2 Estructura de la Trama tipo 2 [6].

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_{symb}^{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 ($N_{symb}^{DL} * N_{SC}^{RB}$) resource elements RE, corresponde a un slot en el dominio del tiempo y 180KHz en el dominio de la frecuencia.

Configuración Dowlink		N_{symb}^{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

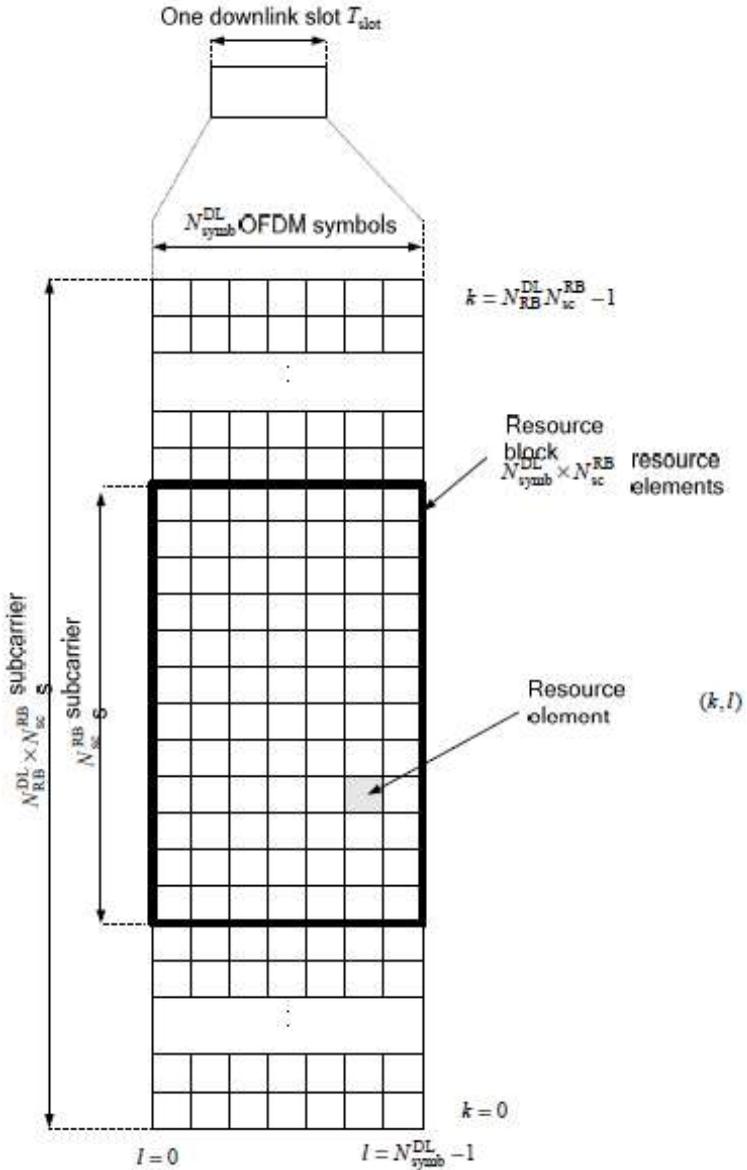


Fig. 3 Estructura del resource grid de Downlink [6].

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

- 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 dowlink 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 dowlink.

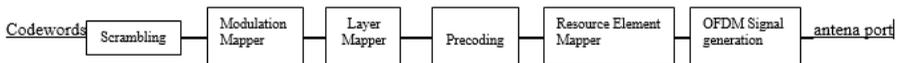


Fig. 4 Descripción general del procesamiento de canales físicos [6].

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, spacial 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 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.

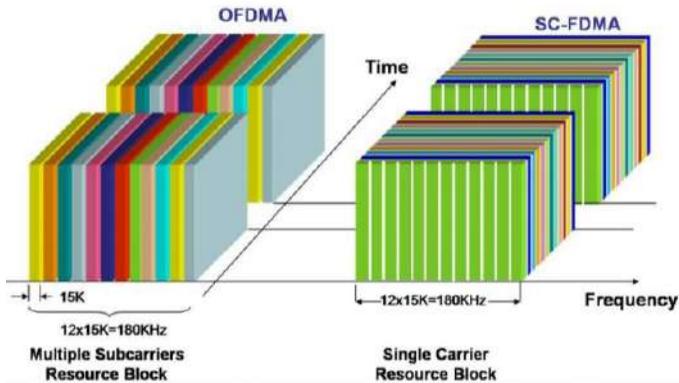


Fig. 5 Asignación de recursos con OFDMA y SC-FDMA en tiempo y frecuencia. [7]

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 investigación. 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.

a) 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*).

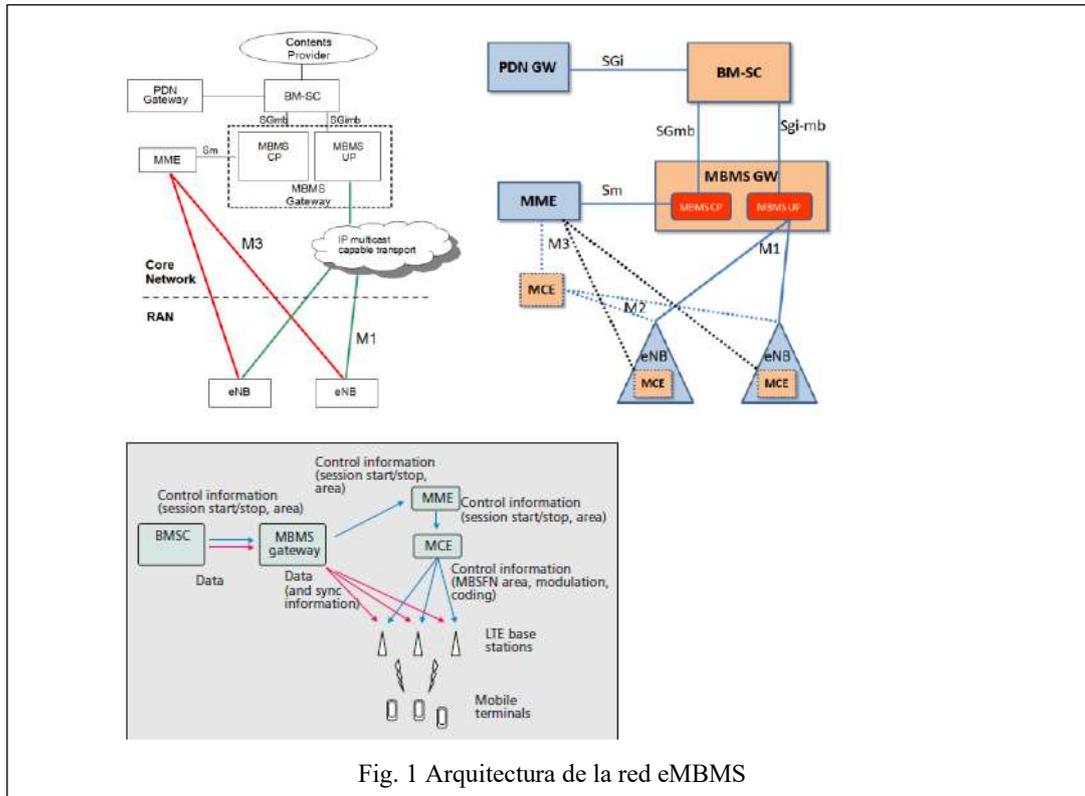


Fig. 1 Arquitectura de la red eMBMS

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.

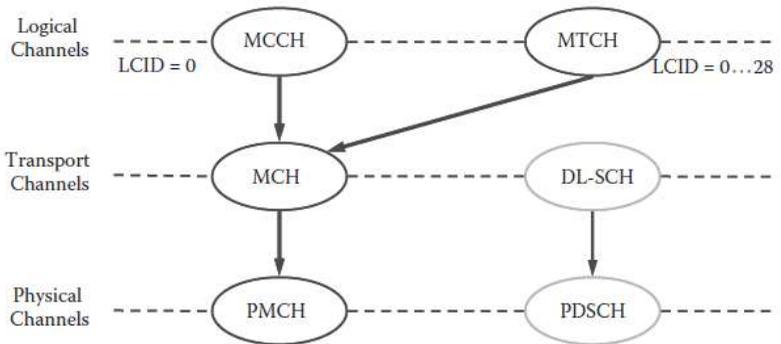


Fig. 6 Canales Lógicos, Canales de Transporte y Canal Físico de eMBMS

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.

b) *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 Δf 15 kHz es el modo utilizado por defecto para MBSFN.

Prefijo Cíclico	Δf	Overhead PC	ISD SFN
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*).

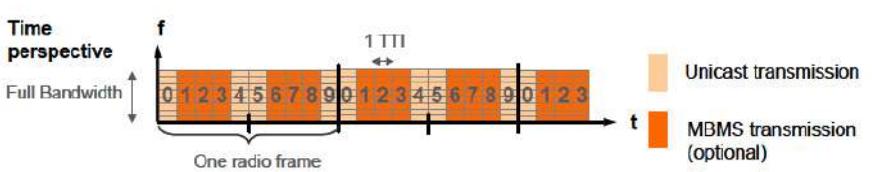


Fig. 7 Multiplexación temporal de datos eMBMS y datos unicast en modo MBSFN. Modo FDD.

III. LTE (LONG TERM EVOLUTION)

III.1 ESTANDARIZACIÓN DE LTE

Se presenta como la evolución de la tecnología celular UMTS conocida como E-UTRA (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) y E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network).

LTE es parte de un camino de tecnologías de alta velocidad y baja latencia que comprende GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA y HSPA+, como se muestra en la Figura 9.

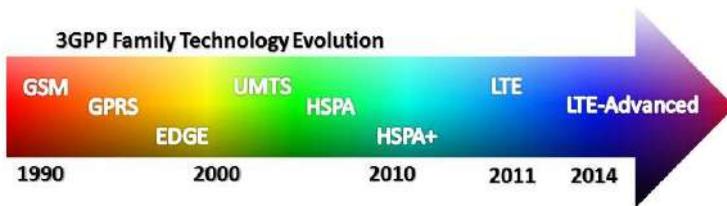


Fig. 9. Evolución de las tecnologías celulares

LTE en comparación a sus predecesores tiene mejoras en la interfaz aire, utiliza OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) basado en modulación y esquemas de acceso múltiple para el downlink, junto con SC-FDMA para el uplink, lo que permite obtener mayor velocidad de transmisión.

Las tecnologías HSPA y LTE han evolucionado con los diferentes release que ha emitido la 3GPP, En la Figura 10 se presenta un resumen de las velocidades de uplink y downlink de dichas tecnologías, también podemos observar que a partir del release 10

LTE alcanza velocidades acorde a los requerimientos de cuarta generación pasando a ser LTE- Advance.

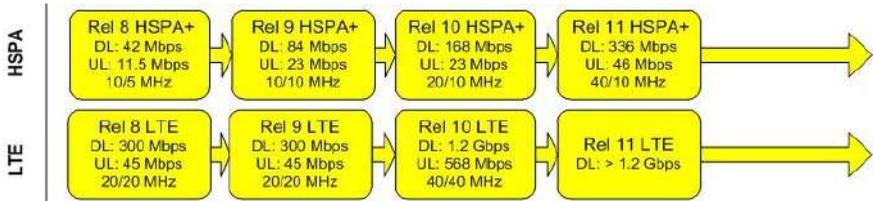


Fig. 10. Velocidad de datos de Down Link y Up Link de HSPA y LTE

III.2 ARQUITECTURA LTE

Los servicios que se pueden ofrecer a través de la red LTE incluye varios sub- sistemas los cuales pueden estar proporcionados por: servicios basados en redes IMS 59 en donde el operador brinda servicios basado en el protocolo SIP (Session Initiation Protocol), servicios basados en redes no IMS en donde el usuarios accede a servicios mediante un servidor que el operador coloca en su red, por ejemplo video streaming y servicios proporcionados a través de Internet en donde el usuario se conecta a un servidor de Internet para acceder a servicios como navegación web o a un servidor SIP para establecer una llamada de voz (VoIP).

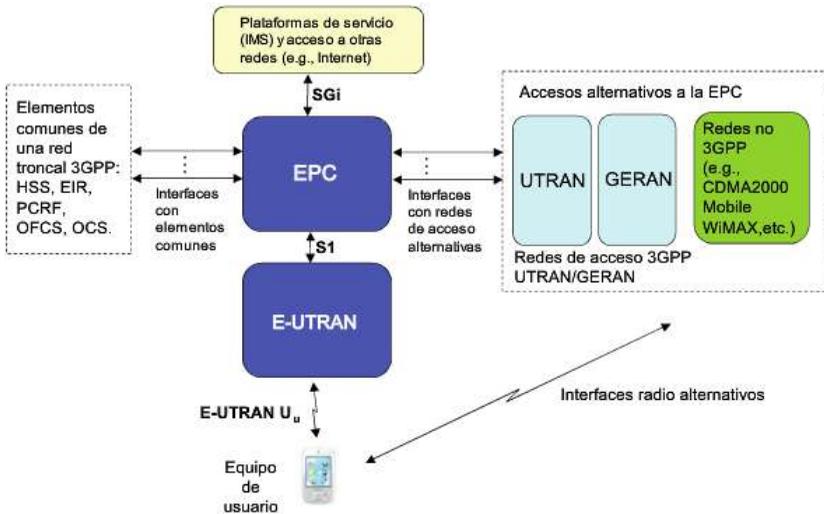


Fig. 10. Arquitectura red

EPC, E-UTRAN y el equipo de usuario, forman la capa de conectividad IP llamada también EPS (Evolved Packet System). EPS presenta un cambio importante en la arquitectura de red, se elimina el nodo denominado RCN (Radio Network Controller) cuyas funciones son implementadas en el eNodeB reduciendo retrasos y optimizando la red.

Para aprovechar todas las ventajas de las tecnologías y permitir la coexistencia de tecnologías con arquitecturas de paquetes se ha desarrollado un nuevo núcleo de red EPC (Evolved Packet Core). EPC está basado en protocolos TCP / IP, lo cual permite la interconexión entre redes fijas e inalámbricas. Los elementos que forman la EPC son:

Serving Gateway Y PDN Gateways, son dos elementos de red que se conectan mediante la interfaz S5 y conforman el SAE GW que permite tener salida hacia las redes públicas de datos. SERVING GATEWAY Es el nodo que termina la interfaz del plano de usuario hacia la red de acceso radio. Para cada terminal de usuario asociado con el EPC hay un único S-GW asignado en cada momento, que actúa como punto de anclaje local para la movilidad entre redes 3GPP. PDN GATEWAYS Es el nodo que permite acceder a redes de datos públicas. Si un usuario está accediendo a múltiples redes PDN, puede haber más de un P-GW asignado a él, actuando como punto de anclaje para movilidad hacia redes no-3GPP y aplicando las políticas de utilización de red para el tráfico de usuario.

Mobility Management Entity (Entidad de la Administración de la Movilidad - MME) es el elemento de control de la EPC encargada únicamente de la señalización por lo que en él a no se transportan paquetes con tráfico de datos de los usuarios. MME administra la movilidad, las identidades UE y los parámetros de seguridad, también realiza tareas como la autenticación, autorización y señalización no ligada al acceso lo que permite a los operadores dimensionar la señalización y el tráfico de manera independiente. Las funciones de MME incluyen señalización NAS y seguridad asociada, señalización entre nodos de red central para movilidad entre redes de acceso 3GPP

y, así también permite al operador manejar, de manera independiente, la señalización y el tráfico de usuario.

HSS (Home Subscriber Server), es el encargado de almacenar información de suscripción y datos de autorización necesarios para el acceso del usuario al sistema y se lo considera como una evolución del HLR (Home Location Register) de GSM. Contiene toda la información de suscripción del usuario necesaria para gestionar sesiones.

PCRF (Policy and Charging Rule Function), es el encargado de gestionar y provisionar en la “PDN SAE GW” las políticas de calidad de servicio y tarificación a aplicar al tráfico de usuario. El PCRF no es un nodo específico de la nueva arquitectura sino que se define en la Rel.7 del 3GPP.

III.3. INTERFAZ AIRE

La interfaz aire de LTE se denomina E-UTRAN, está constituida por varios eNB (Evolved Node B) conectados entre ellos mediante interfaces X2, se lo considera como la estación base de LTE que interconecta equipos de usuario y la red además cumple varias funciones de control. E-UTRA se enlaza al siguiente nivel, EPC, mediante la interfaz S1 que conecta los eNB con la (MME) Mobility Management Entity y (S-GW) Serving Gateway. El nodo que constituye E-UTRAN se denomina eNode B el cual es una radio base

que se ubica junto a las antenas de radio y es un elemento que enlaza al equipo de usuario con EPC, cumple la misma tarea que una BTS en una red GSM. Las funciones son seleccionar el MME (Mobility Management Entity), enrutar datos hacia S-GW; además el eNode B revoluciona las arquitecturas actuales debido a que incorpora las características de la RCN 63, lo que hace que se reduzca considerablemente la latencia del sistema. El eNode B es responsable de la compresión de cabecera, cifrado y entrega de paquetes. En el plano de control se encarga de funciones como la admisión, control y gestión de recursos de radio.

e NODE B. La estructura de capas del eNodeB posee protocolos y capas distribuidos en la estructura los cuales se describen a continuación:

CAPA 1. Aquí se encuentra el soporte para la interfaz aire, permite que el resto de las capas accedan a la información.

CAPA 2. Se encuentran las siguientes subcapas:

MAC (Medium Access Control). Realiza el mapeo de los canales lógicos y canales de transporte, multiplexación / RLC demultiplexación de PDUs pertenecientes a uno o varios portadores dentro/desde los bloques de transporte entregados de / desde la capa física en los canales de transporte; además reporta el volumen de tráfico, corrección de errores, prioridades entre el usuario y los canales

lógicos, prioridades entre los usuarios basado en una programación dinámica y la selección del formato de transporte.

RLC (Radio Link Control). Transfiere PDUs de la capa superior soportando (AM) acknowledged mode o (UM) unacknowledged mode en la transferencia de datos en modo transparente; también realiza la corrección de errores, segmentación de acuerdo al tamaño de TB, re-segmentación de PDUs que necesitan ser retransmitidos.

PDPC (Packet Data Convergence Protocol). Realiza la compresión y descompresión de cabecera, en el plano de control realiza cifrado, transferencia de datos en este plano.

RRC (Radio Resource Control). Establece, mantiene y libera la conexión RRC entre el equipo de usuario y E-UTRAN, maneja portadoras de señales de radio, asiste en el campo de la seguridad, movilidad, activa el modo handover y gestión de QoS.

Equipo de usuario. Proporciona al usuario la capacidad de comunicarse con la red LTE, pueden ser teléfonos, modems, etc. Estos dispositivos contienen un módulo de identificación denominado USIM (Universal Subscriber Identity Module) que es una aplicación que se ejecuta en una tarjeta UICC (Universal Integrated Circuit Card). El módulo de identificación del abonado es usado para identificar y

autenticar al usuario mediante claves de seguridad proporcionando protección a las comunicaciones.

III.4 EL ESQUEMA DE ACCESO

LTE utiliza esquemas de acceso que le permiten reducir la interferencia y aumentar la capacidad de la red, los cuales son:

OFDMA (Frequency Division Multiple Access) para el downlink. Es una versión multiusuario de OFDM, estandarizada en el Release 8 y Release 9 del 3GPP, en donde una señal se divide en subportadoras de varios usuarios de modo que el OS pueden recibir datos simultáneamente. OFDMA es utilizado en downlink debido a que permite lograr altos picos de velocidad de datos, pero no es utilizado en uplink debido a que da lugar a un elevado PAR 67 de la señal que compromete la eficiencia en potencia y por consiguiente la vida útil de las baterías.

La aplicación práctica de OFDMA comprende el uso de de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y la operación inversa (IDFT) para moverse en los dominios del tiempo y la frecuencia. En OFDMA se crean subportadoras ortogonales las que no se interfieren entre si tal y como lo muestra la Figura 4. Los espacios entre subportadoras, es de 15 KHz, independientemente del ancho de banda total de transmisión.

Para evitar la interferencia entre símbolos OFDMA se utilizan prefijos cíclicos, en los que el tamaño es muy importante, si es muy pequeño no contrarresta la distorsión multitrayecto y si es muy grande reduce la capacidad de procesamiento de datos, por lo que se lo selecciona tomando en cuenta el mayor tiempo de retardo del canal.

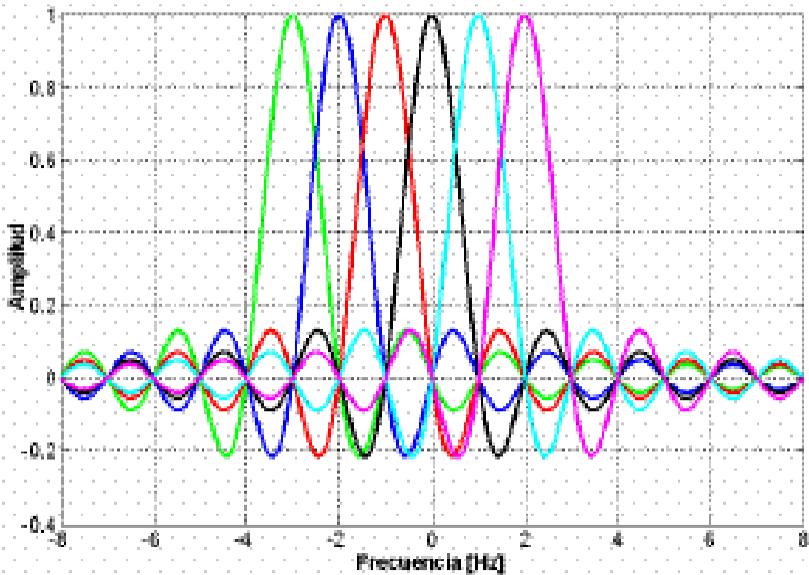


Fig. 11. Subportadoras ortogonales traslapadas

SC-FDMA tiene como objetivo reducir el Peak to Average Ratio (PAR), de 2 a 3 dB, valor inferior a una señal OFDMA; además se la utiliza debido a que esta técnica ahorra el uso de amplificadores de potencia en el equipo del usuario. SC FDMA transmite M símbolos secuencialmente cada uno ocupando todo el ancho de banda

disponible y con una duración igual a una parte del tiempo de símbolo, como se puede apreciar en la Figura 12.

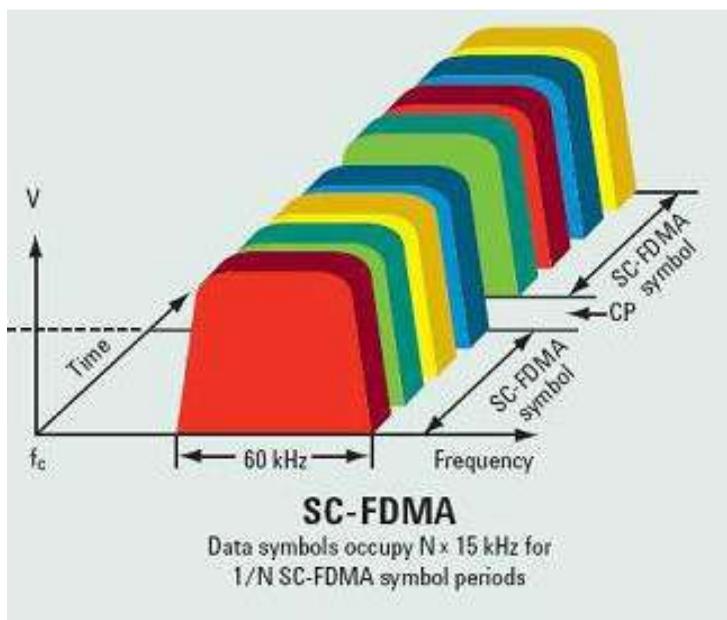


Fig. 12. Símbolos SC FDMA

Todos los anchos de banda de transmisión tienen el mismo intervalo de tiempo de transmisión (1 ms). Para transmitir se utilizan dos tipos de estructuras y está establecida en tramas de 10 milisegundos. La primera trama, consta de 20 slots de 0,5 mseg numerados del 0 al 19, una subtrama es considerada como dos slots consecutivos. Esta trama es aplicable para FDD y TDD.

III.4 CANALES UTILIZADOS EN LTE

Se agrupan en tres categorías estos son:

Canales físicos. Son canales de transmisión que transportan datos de usuario y control.

Los canales físicos utilizados en downlink son Physical Broadcast Channel (PBCH). Es un canal que se utiliza para transmitir información de identificación y control (aproximadamente cada 40 ms) a todos los usuarios que se encuentran en el área de cobertura. Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH). Es un canal que sirve para transferir información que describe el tipo de modulación del canal (número de símbolos OFDM).

Physical downlink control channel (PDCCH). Es utilizado para transferir información de control a dispositivos móviles. La información que transmite es de control de acceso. Physical HARQ Indicator Channel (PHICH). Es utilizado para informar el estado de Hybrid ARQ.

Physical Downlink Shared Channel (PDSCH). Es utilizado para transmisión unicast y funciones de paging. Physical Multicast Channel (PMCH). Es utilizado para enviar información a varios usuarios (multicast) que se encuentran dentro del área de cobertura.

Los canales físicos utilizados en uplink son Physical Uplink Control Channel (PUCCH) Es utilizado para enviar información de señalización de datos como ARQ, ACK, NAK. Physical Uplink

Shared Channels (PUSCH) Cumple la misma función que el canal PDSCH en el proceso de uplink.

Physical Random Access Channel (PRACH) Es utilizado para coordinar y transportar peticiones de servicio de los dispositivos móviles.

Canales de transporte. Son aquellos que definen como y con qué características la información es transmitida por la interfaz radio.

Los canales de transporte en downlink son Broadcast Channel (BCH) Transmite continuamente información del sistema además examina y mide intensidades de señal, controlando el acceso de los dispositivos móviles que funcionan dentro del área de cobertura.

Downlink Shared Channel (DL-SCH) Es un canal de comunicación que transmite datos desde el sistema (estación base) a los dispositivos móviles. La estación base asigna los slots de tiempo y canales de radiofrecuencia para transmitir y recibir información de los usuarios.

Paging Channel (PCH) Es un canal que se utiliza para enviar mensajes que alertan al dispositivo móvil de una llamada de voz entrante, solicitud para establecer una comunicación de voz o para solicitar servicio de mantenimiento por ejemplo actualización de posición.

Multicast Channel (MCH) Es utilizado para enviar información desde uno a varios dispositivos permitiendo la transmisión de simultánea de los mismos medios de comunicación en la misma frecuencia por ejemplo un programa de TV.

Los canales de transporte utilizados en el uplink son Uplink Shared Channel (UL-SCH) Es el principal canal de transporte que envía al sistema datos de control o de usuario en el enlace ascendentes. Random Access Channel (RACH) Es utilizado para requerimientos de acceso aleatorio.

Canales lógicos. Son canales que proporcionan servicios para el control de acceso al medio, agrupan a los canales de control y de tráfico.

Los Canales de Control. Broadcast Control Channel (BCCH) Es utilizado para proporcionar información del sistema a todos los terminales móviles conectados a un determinado eNode B.

Paging Control Channel (PCCH) Este canal de control es utilizado para enviar mensajes a dispositivos móviles para alertar de una llamada telefónica entrante o para solicitar una sesión de comunicación de datos.

Common Control Channel (CCCH) Se utiliza para establecer y mantener enlaces de comunicación entre los dispositivos móviles y las estaciones base.

Multicast Control Channel (MCCH) Transmite parámetros necesarios de identificación y acceso de los servicios y canales multicast. Dedicated Control Channel (DCCH) Es utilizado para coordinar y controlar dispositivos móviles como por ejemplo control de energía, handover, etc.

Canales de tráfico. Dedicated Traffic Channel (DTCH) Es utilizado para la transmisión de datos de usuario. Multicast Traffic Channel (MTCH) Es utilizado para la transmisión multicast.

III.5 MODOS DE COMUNICACIÓN

LTE soporta dos tipos de comunicación FDD (Frequency Division Duplexing) y TDD (Time Division Duplexing).

En el modo FDD el transmisor y el receptor funcionan a diferentes frecuencias por lo tanto permite la transmisión simultánea de información. En la comunicación FDD se considera la presencia de una banda de guarda para evitar la interferencia entre la señal que se transmite y se recibe. Las bandas son asignadas por los entes reguladores; en la TABLA I se muestra tal distribución para LTE.

TABLA I
BANDAS DE FRECUENCIA FDD [2]

Canales E-UTRA	Banda de operación		Canales Ancho de Banda (MHz)
	Uplink (MHz) UE	Downlink (MHz) BS	
1	1920-1980	2110-2170	5,10,15,20
2	1850-1910	1930-1990	1.4,3,5,10,15,20

3	1710-1785	1805-1880	1.4,3,5,10,15,20
4	1710-1755	2110-2155	1.4,3,5,10,15,20
5	824-849	869-894	1.4,3,5,10
6	830-840	875-885	5,10
7	2500-2570	2620-2690	5,10,15,20
8	880-915	925-960	1.4,3,5,10
9	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9	5,10,15,20
10	1710-1770	2110-2170	5,10,15,20
11	1427.9-1452.9	1475.9-1500.9	5,10,15,20
12	698-716	728-746	1.4,3,5,10,
13	777-787	746-756	1.4,3,5,10
14	788-798	758-768	1.4,3,5,10
17	704-716	734-746	1.4,3,5,10

En el modo TDD los enlaces ascendentes y descendentes utilizan una sola frecuencia por lo tanto el transmisor y el receptor envían información en tiempos diferentes. TDD es muy utilizado para comunicaciones asimétricas. La TABLA II muestra las bandas asignadas para TDD:

TABLA II
BANDAS DE FRECUENCIA TDD [2]

Banda de Operación E-UTRA	Banda de operación	Canales Ancho de banda (MHz)
33	1900 MHz – 1920 MHz	5,10,15,20
37	1910 MHz – 1930 MHz	5,10,15,20
39	1880 MHz - 1920 MHz	5,10,15,20
34	2010 MHz - 2025 MHz	5,10,15
38	2570 MHz - 2620 MHz	5,10
40	2300 MHz - 2400 MHz	10,15,20
35	1850 MHz - 1910 MHz	1.4,3,5,10,15,20
36	1930 MHz - 1990 MHz	1.4,3,5,10,15,20

IV.6 SISTEMAS MULTIAN TENA

Uno de los esquemas multiantena que LTE utiliza es MIMO (Multiple Input Multiple Output), con lo que aprovecha la propagación

multitrayecto para aumentar la tasa de transmisión de datos, disminuir los errores y obtener un mejor alcance.

MIMO se ha definido de varias maneras: como dos o más señales de radio diferentes, en el mismo canal de radiotransmisión, donde cada señal lleva distinta información digital y/o como dos o más señales de radio que utilizan formación de un haz, combinación de recepción y multiplexación espacial.

MIMO se estandarizó en el 3GPP Release 6, y se desarrolló aún más en el Release 7 con multiplexado especial para HSPA+.

Con MIMO, el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor permite un aumento sustancial de las tasas máximas de datos, eficiencia espectral significativamente mayor, especialmente en entornos de baja interferencia, mayor capacidad del sistema (número de usuarios).

Sobre la base de resultados de simulación presentados en el informe, MIMO Transmission Schemes for LTE and HSPA Networks, se demostró que el esquema de transmisión relativamente sencillo de MIMO basado en un circuito cerrado de 2x2, transmitiendo los equipos de usuario a bajas velocidades, puede incrementar la eficiencia espectral en downlink en un 20% respecto de la transmisión con una sola antena.

Los operadores de redes inalámbricas ven la necesidad de emplear MIMO debido a sus ventajas. Los sistemas inalámbricos que utilizan MIMO representan una forma económica de aumentar la capacidad, el rango y la velocidad de transmisión al usuario en una variedad de entornos, entre los cuales los más notables son los entornos cerrados y con baja interferencia de radio, como las celdas pequeñas y / o aisladas.

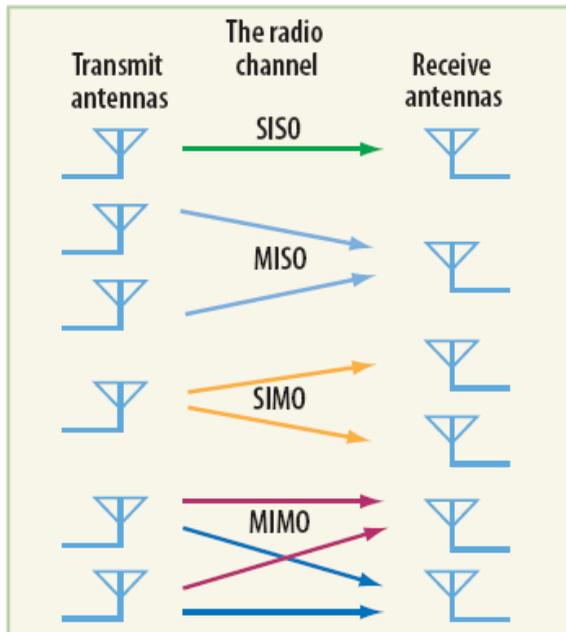


Fig. 13. Técnicas de antenas

Entre las configuraciones que puede tener MIMO, como podemos observar en la Figura 13, están:

Single Input Single Output (SISO) Es la tecnología de antenas más simple, en esta configuración tanto el transmisor como el receptor tienen solo una antena; en ciertos entornos es vulnerable a los problemas causados por los efectos multi-trayectoria.

Multiple Input Single Output (MISO) En este tipo de configuración MIMO, el transmisor tiene varias antenas para transmisión y una para recepción.

Single Input Multiple Output (SIMO) En este caso el transmisor tiene una antena en el transmisor y varias en el receptor.

Multiple Input Multiple Output (MIMO) MIMO emplea varias antenas en el transmisor y en el receptor, relacionando la capacidad de transmisión con el número de antenas instaladas.

MIMO se estandarizó en el 3GPP Release 6 (Rel-6).

IV. LTE-A

La tecnología LTE-A (Long Term Evolution Advance) es la evolución de LTE razón por la cual posee todas sus características, además de varias mejoras. pero para esto LTE Advanced debe cumplir una serie de requisitos relacionados a su compatibilidad hacia atrás con LTE Release 8, en cuanto a su compatibilidad espectral , LTE-Advanced debe poder desplegarse en las bandas ocupadas por LTE, así mismo el equipamiento LTE debería poder incorporar las funcionalidades de LTE-Advanced con una complejidad y coste razonablemente bajos, fundamentándose íntegramente en las especificaciones existentes de LTE Release 10 y no definida por una nueva serie de especificaciones. siendo una actualización de software para las redes LTE aumentando las velocidades de datos, área de cobertura y el rendimiento celular de última generación. Al ser una red totalmente basada en IP, se proveerá de calidad de servicio QoS.

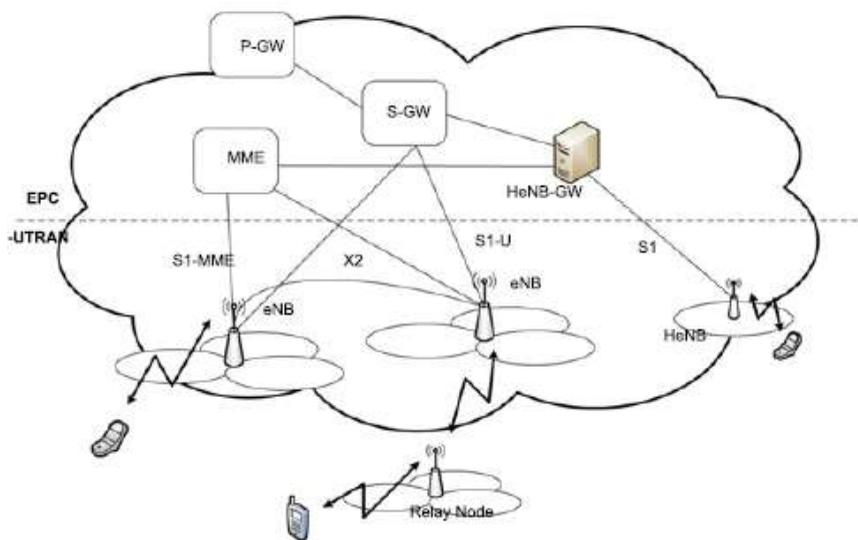


Fig. 14. Arquitectura LTE- Advanced E-UTRAN

La Fig. 14. muestra la arquitectura de E-UTRAN para LTE Advanced.

La parte central en la arquitectura E-UTRAN es el nodo B mejorada (eNodoB o eNB), que proporciona la interfaz de aire con plano de usuario y el protocolo de control de aviación terminaciones hacia el UE. Cada uno de los eNBs es un componente lógico que sirve uno o varios E-UTRAN células, y la interconexión de los eNBs interfaz se llama la interfaz X2. Adicionalmente, Home eNBs (HeNBs, también llama femtocells), que son eNBs de menor coste para mejora la cobertura en interiores, se puede conectar a la EPC directamente o a través de una puerta de

enlace que proporciona adicional soporte para un gran número de HeNBs.1 3GPP Además, está considerando nodos de retransmisión y de transmisión sofisticado estrategias para la mejora de rendimiento de la red.

Los objetivos de esta nueva tecnología se incrementó la cobertura, mayores velocidades de datos, y mejor QoS rendimiento y la equidad para diferentes usuarios. Como se mencionó anteriormente, eNBs proporciona el E-UTRAN con los usuarios y el control necesarios de protocolos del plano de terminación.

LTE-A no se basa en la tecnología CDMA (Code Division Multiple Access), que utiliza OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) como una interfaz de aire. LTE-Advanced tiene varias características importantes: las tasas máximas de datos de hasta 300 Mbps en bajada y 75Mbps de subida, la movilidad apoyar hasta 300 km / h hasta 500 kmh, la latencia tan baja como 5 ms, más de 200 usuarios por celda 5Mhz, soporta tanto FDD (división de frecuencia doble cara) y TDD (dúplex por división de tiempo), la flexibilidad de ancho de banda de hasta 20 Mhz y soporte MIMO de 2 x 2 y 4 x 4 modos. Dado que la red está todo basado en paquetes que reduce la latencia del plano de control en comparación con las tecnologías de sus predecesores

IV.1 AGREGADO DE PORTADORAS

Para llegar a 1 Gbps LTE-A permite aumentar el ancho de banda hasta los 100 MHz de los 20 MHz de LTE, para ello divide este espectro en 5 bloques básicos de 20 MHz, para así poder asignar de esta manera dinámicamente el mejor bloque que se adapte de acuerdo a las necesidades de la red soportando asignaciones contiguas y no contiguas como se muestra en la Figura 15.

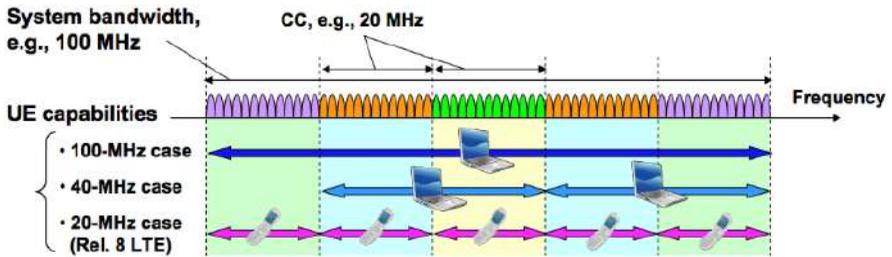


Fig. 15 . Asignación dinámica del espectro.

Cada uno de los bloques llamados componentes de portadora se añade como se muestra en la Figura 16. Los parámetros de radio que se incluyen en cada bloque están basados en LTE, estos usuarios pueden acceder a ellos por esta razón es que un equipo con tecnología LTE puede incorporarse fácilmente en la red de LTE-A sin necesidad de cambiar su dispositivo o realizar alguna modificación en el terminal móvil.

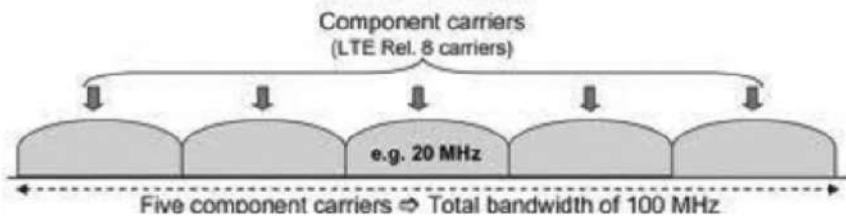


Fig. 16. Agregado de portadora

IV.2 MULTIPLEXADO ESPACIAL AVANZADO

LTE-Advanced estudia sobre los mejores esquemas de MIMO que son usados por LTE, tanto para el canal de bajada como para el canal de subida es por esta razón que utiliza un número mayor de antenas: de 8 en la estación base y 4 en el terminal móvil.

En el canal de bajada se pone un especial interés en los sistemas multi-usuario para poder proporcionar mejoras en la supresión de interferencias entre usuarios.

En el canal de subida, el estudio de la transmisión mono-usuario está considerado los de los puntos clave para mejorar la tecnología de LTE.

IV.4 MIMO

Tecnología múltiple entrada múltiple salida se utiliza múltiples antenas que hace uso de las señales reflejadas para proporcionar ganancias de canales en robustez y el rendimiento.

Los niveles adicionales de potencia de procesamiento están disponible, es posible utilizar la diversidad espacial y multiplexación espacial completo, un canal puede verse afectado por el desvanecimiento que afecta la relación señal a ruido que a su vez afecta a la tasa de error si los datos son transmitidos.

Existen varios modos de diversidad que proporcionan una serie de ventajas:

La diversidad de tiempo, es decir un mensaje puede transmitirse en diferentes momentos utilizando diferentes intervalos de tiempo y codificación de canal.

Diversidad de frecuencia utiliza frecuencias diferentes que usa diferentes canales o tecnologías como espectro ensanchado OFDM.

Diversidad espacial es la base para MIMO que utiliza antenas situadas en posiciones diferentes para tomar ventaja de las trayectorias diferentes de radio existentes en un entorno terrestre.

La idea central de MIMO inalámbrico de procesamiento de señal con la dimensión espacial en el uso de múltiples antenas situadas en puntos diferentes , al aumentar numerosas antenas es posible aumentar linealmente el rendimiento del canal con cada par de antenas añadidos al sistema, es por ello que MIMO es una de las técnicas más importantes, el ancho de banda espectral está convirtiéndose en un bien cada vez más valioso para los sistemas de comunicaciones de

radio, las técnicas son necesarias para utilizar el ancho de banda disponible más eficazmente.

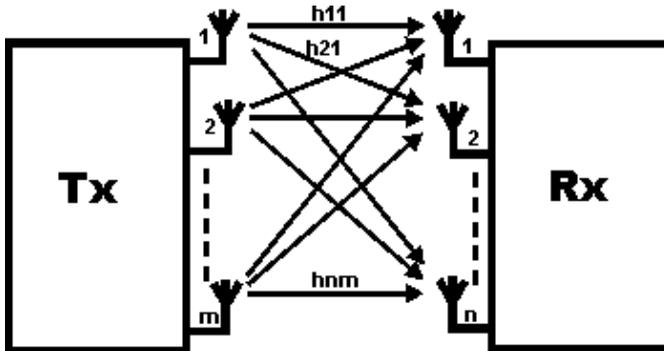


Fig. 17. Esquema general del sistema MIMO

IV.4 COORDINACIÓN MULTIPUNTO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN

El objetivo de la coordinación multipunto o CoMP es aumentar el rendimiento del sistema con un mínimo de complejidad aunque el terminal móvil está ligado a una estación base que es la encargada de enviar información de sincronización y control donde las estaciones base cercanas pueden aliarse para enviar o recibir hasta o desde el terminal. El funcionamiento interno se basa en el funcionamiento de la técnica de MIMO en su manera de aprovechar el efecto multi-camino que en este caso las antenas se encuentran distribuidas en zonas alejadas.

LTE CoMP tiene algunas ventajas como una mejor utilización de la red al aplicar conexiones a varias estaciones. Los datos pueden transmitirse a través de las estaciones base menos cargados para mejor utilización de recursos. Proporciona un rendimiento de mayor recepción gracias al uso de varios sitios de celdas para cada conexión, significa que la recepción total será mejorada y el número de llamadas perdidas se reduce. Recepción en múltiples sitios y aumento de potencia recibida por la recepción en múltiples estaciones base o sitios utilizando técnicas LTE coordinados multipunto que permite recibir la potencia total en el micro teléfono. Reducción de interferencias mediante el uso de técnicas especializadas de combinación es posible utilizar la interferencia constructiva en lugar de la destructiva para reducir los niveles de interferencia.

En la Fig. 18 se muestra un ejemplo de CoMP en el canal de bajada con dos usuarios UE y UE2, eNB1 es la estación base principal de UE1 y las otras cooperan con esta para crear una transmisión multipunto.

Se toman en cuenta dos puntos de vista a la hora de implementar CoMP en el canal de bajada como:

Coordinación de sincronización y/o *beamforming*. La transmisión la realiza la estación base principal. Sin embargo el

beamforming, se coordina entre estaciones base para controlar y/o reducir interferencias entre transmisiones.

CoMP en el canal de subida implica la recepción en múltiples puntos geográficamente separados. Las decisiones de sincronización se toman de manera coordinada a fin de controlar la interferencia.

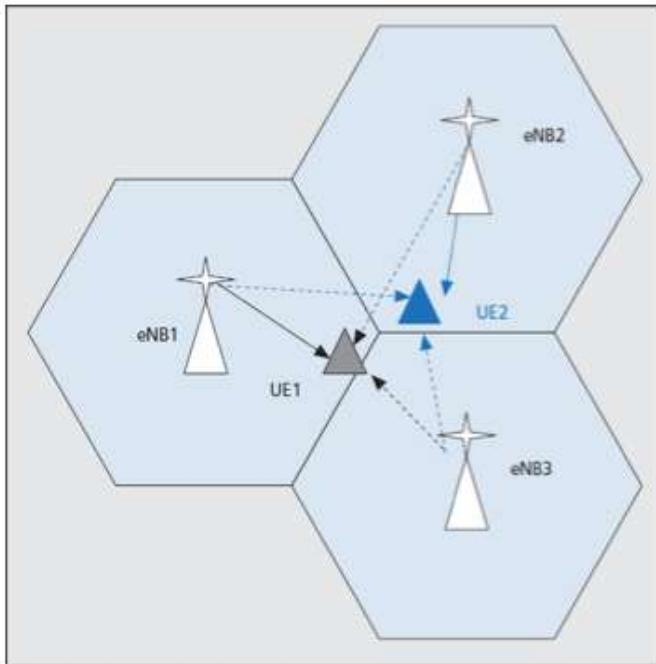


Fig. 18. Esquema CoMP en el canal de bajada

IV.5 REDES HETEREOGENIAS

Debido a los obstáculos del entorno y al uso de altas frecuencias que implica una atenuación que consigue tasas de transmisión elevadas las estaciones bases deben encontrarse cerca de

los usuarios, las redes heterogéneas distribuyen nodos de comunicación simples y baratos dentro de las celdas, estos nodos se comportan como puentes entre los terminales móviles y las estaciones base.

Tiene varias clases de estos nodos: Pico-estación base, femto-estación base, nodo relay y DAS (sistemas distribuidos de antenas). LTE-A se centra en los nodos *relay* que son dispositivos similares a las estaciones base pero mucho más sencillos. Existen 2 tipos:

Tipo 1. Permite extender la cobertura de la celda a la que esta ligada, se comporta como una estación base, y tiene su propio identificador de celda, por lo que no es transparente con el usuario.

Tipo 2. Permite aumentar la calidad capacidad de una zona gracias a su colocación y al aprovechamiento del efecto multi-camino y se le considera como un equipo transparente para el usuario.

La utilización de este tipo de nodos permite extender la cobertura y aumentar el rendimiento en zonas determinadas como se muestra en la Figura 19.

Esta técnica utiliza estrategias colaborativas como CoMP que permite enlazar con todos los nodos y estaciones base entre sí.

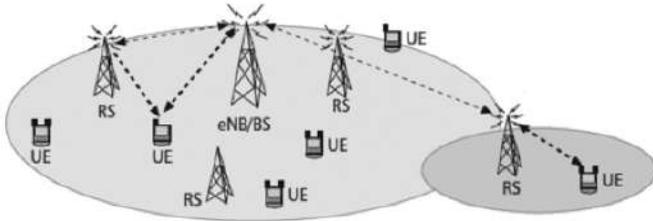


Fig. 19. Esquema de una celda con nodos relay

V. COMPARATIVA LTE Y LTE-A

La ITU-R establece las características para que un protocolo pueda denominarse 4G con varios requerimientos de eficiencia y capacidad en la tabla III se muestra estos requerimientos con los valores de LTE y LTE-A en donde se ve que LTE no llega a cumplir con la mayoría de los parámetros. Sin embargo, LTE-A supera los parámetros los valores mínimos requeridos.

Para poder superar y colocarse a la cabeza de las tecnologías 4G, con las mejores previas LTE-Advanced busca mejoras en tasas de datos de pico y promedio, eficiencia espectral, latencia, para lograr cumplir con estos requerimientos de IMT Advanced algunas características de LTE se han definido en los detalles de pico de tasa de datos que pueden ser alcanzados de la siguiente forma:

Utilizando las capacidades de MIMO descendente (hasta MIMO 8x8 de único usuario) y MIMO ascendente (hasta MIMO 4x4 de usuario).

TABLA III
REQUISITOS PARA 4G ENTRE LTE Y LTE-A

	DL/ UL	Conf. Antena	LTE	LTE-A	Req. 4G
Tasa	DL	-	300Mbps	1Gbps	1Gbps
Trans.	UL	-	75Mbps	500Mbps	500Mbps
Eficiencia	DL	-	15	30	15
Espacial (bps/Hz/celda)	UL	-	3,75	15	6,75
Capacidad	DL	2x2	1,69	2,4	-
(bps/Hz/celda)		4x2	1,87	2,6	2,2

	4x4	2,67	3,7	-
UL	1x2	0,74	1,2	-
	2x4	-	2	1,4

Usando agregación de banda o portadora LTE-Advanced permite la agregación de hasta cinco portadoras de hasta 20MHz cada una para obtener un ancho de banda de transmisión de 100 MHz . Que permite compatibilidad hacia atrás que pueden ser configuradas como 3GPP Release 8, hoy en día ninguna operadora posee 100MHz de espectro continuo, los proveedores de servicio manejan bloques de frecuencia en bandas diferentes para de esta manera poder soportar la máxima flexibilidad del uso del espectro disponible, la agregación de portadora en LTE-Advanced está disponible en espectro contiguo y como no contiguo.

V.1 CARACTERÍSTICAS DE LTE Y LTE-A

Alta eficiencia espectral. OFDM de enlace descendente robusto frente a las múltiples interferencias y de alta afinidad a las técnicas avanzadas como la programación de dominio frecuencial del canal dependiente y MIMO. DFTS-OFDM (single-Carrier FDMA) al enlace ascendente, bajo PAPR, ortogonalidad de usuario en el dominio de la frecuencia.

Multi-antena de aplicación. Muy baja latencia con valores de 100 ms para el Control-Plane y 10 ms para elUser-Plane. Separación

del plano de usuario y el plano de control mediante interfaces abiertas. Ancho de banda adaptativo de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 Mhz.

Puede trabajar en muchas bandas frecuenciales diferentes. Arquitectura simple de protocolo. Compatibilidad con otras tecnologías de 3GPP. Interfuncionamiento con otros sistemas como CDMA2000. Red de frecuencia única OFDM. Velocidades de pico en bajada de 326,5 Mbps para 4x4 antenas, 172,8 Mbps para 2x2 antenas. Para subida de 86'5 mbps. Óptimo para desplazamientos hasta 15 km/h. Compatible hasta 500 km/h. Más de 200 usuarios por celda. Celda de 5 Mhz. Celdas de 100 a 500 km con pequeñas degradaciones cada 30 km. Tamaño óptimo de las celdas 5 km.

La 2G y 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuito (CS) para la voz mientras que LTE propone la técnica de Conmutación por paquetes IP (PS) al igual que 3G (incluyendo las comunicaciones de voz). Las operadoras UMTS pueden usar más espectro, hasta 20 Mhz. Mejora y flexibilidad del uso del espectro (FDD y TDD) haciendo una gestión más eficiente del mismo, lo que incluiría servicios unicast y broadcast. Reducción en TCO (coste de análisis e implementación) y alta fidelidad para redes de Banda Ancha Móvil

V.2 LTE - ADVANCE RESPECTO A LTE

La tecnología LTE-A es la evolución de LTE razón por la cual posee todas sus características, además de varias mejoras. pero para esto LTE-A debe cumplir una serie de requisitos relacionados a su compatibilidad con LTE Release 8, en cuanto a su compatibilidad espectral , LTE-A debe poder desplegarse en las bandas ocupadas por LTE.

Los principales objetivos para LTE-Advanced que trae este estándar respecto a LTE son:

Mayores velocidades de datos pico enlace descendente de 1Gbps y uplink de 500Mbps. La eficiencia del espectro de 3 veces mayor que LTE. La eficiencia del espectro pico enlace descendente 30bps/Hz; enlace ascendente 15bps/Hz.

El uso del espectro y su capacidad para apoyar el uso de ancho de banda escalable y agregación espectro donde no contiguas del espectro debe ser utilizado. Latencia desde el ralenti a conectado en menos de 50 ms y después más corta que 5 ms en una dirección para la transmisión de paquetes individual. Borde de la celda rendimiento para el usuario que equivale al doble de LTE. Rendimiento para el usuario promedio que es 3 veces mayor que la de LTE. Movilidad igual que en LTE. La compatibilidad LTE Advanced será capaz de interfuncionamiento con 3GPP LTE y sistemas heredados. Aumento del rendimiento gracias a la tecnología MIMO.

Estas son algunas de las metas de desarrollo que se propone LTE-Advanced junto a una serie de tecnologías que permitirá a LTE-Advanced alcanzar las velocidades de datos con un alto rendimiento requerido por MIMO y OFDM que serán las dos técnicas y tecnologías a utilizar mejoradas con respecto a LTE.

A continuación resumiremos en la Tabla 4 las especificaciones de LTE-A comparadas con LTE.

TABLA IV
COMPARATIVA ENTRE LTE Y LTE-A

Variables	LTE	LTE ADVANCED
Velocidad De Uplink (Mbps)	50 Mbps	500 Mbps
Velocidad De Downlink (Mbps)	100 Mbps	1 Gbps
Modulación	64 QAM	64QAM
Latencia	10 ms	6 a 8 ms
Acceso	OFDMA SC-FDMA	OFDMA SC-FDMA
Ancho de banda	Escalable hasta 20 MHz	Escalable hasta 100 MHz
Banda de operación	de 850 MHz, 1,9 GHz	700MHz, 1.7 GHz, 2.1 GHz

V.3 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. 20.

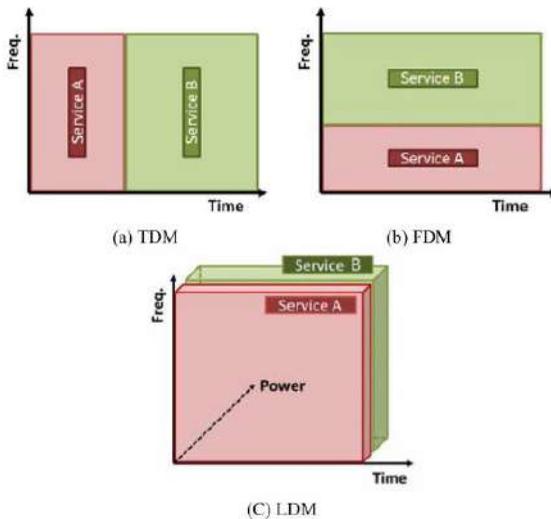


Fig. 20 a) TDM, b) FDM, c) NOMA [5]

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).

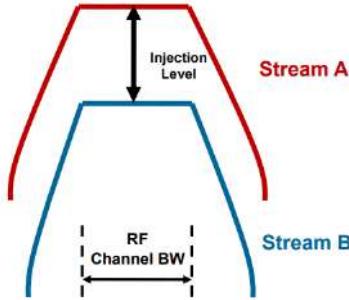


Fig. 21 Transmisión basada en NOMA de 2 capas [5]

II.1.2.1 TRANSMISIÓN

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

$$X_{NOMA}[n, k] = X_{CL}[n, k] + X_{EL}[n, k]$$

(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. 22 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.

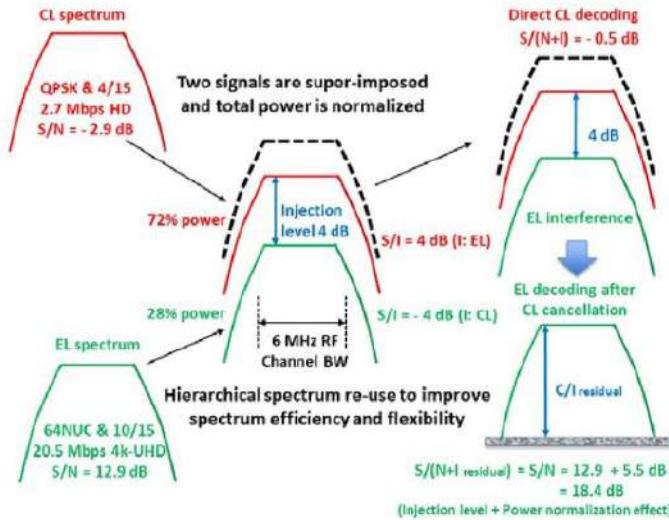


Fig. 22 Proceso de operación del sistema de radiodifusión DTV de dos capas basado en NOMA.

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).

a) *II.1.2.2 RECEPCIÓN*

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

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

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:

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

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, $\hat{X}_{CL}[n, k] = X_{CL}[n, k]$.

VI. SIMULACIÓN Y TECNICAS

VI.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].

VI.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. 23.



Fig. 23 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.

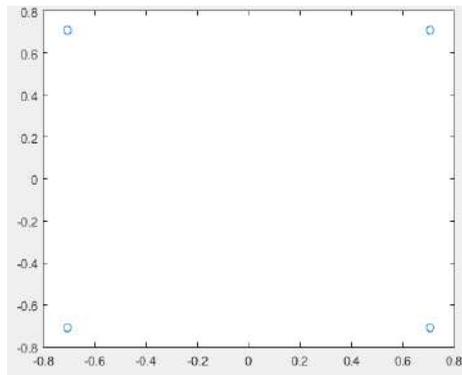
b) La Modulación de los bits aleatorizados para generar símbolos complejos se realiza mediante la variable *nibble* y la función LTE_params_SymbolAlphabet, que dependiendo del orden de modulación 2, 4, 6, las constelaciones son BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM correspondientemente, las constelaciones generadas por el simulador se muestran en la Fig. 24 (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.

Tabla 5 CQI

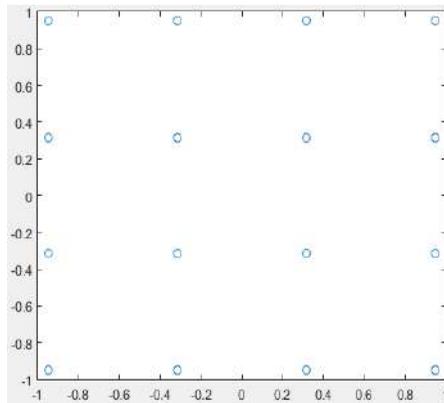
CQI	Modulación	code rate *1024	eficiencia
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,377
4	QPSK	308	0,6016
5	QPSK	449	0,877
6	QPSK	602	1,1758
7	16 QAM	378	1,4766

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

a



b



c

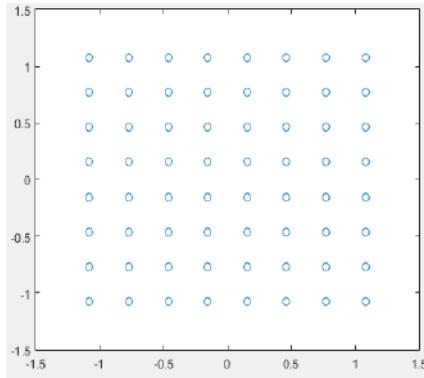


Fig. 24. Constelaciones, a) QPSK, b) 16 QAM, c) 64QAM

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.

VI.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 investigación 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. 25 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 investigación 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_DLSCH_decode`, dentro de esta función se aplica un *rate dematching*, *turbo decoding* mediante las funciones `LTE_rx_turbo_rate_matcher`, `LTE_rx_turbo_decode` correspondientemente.

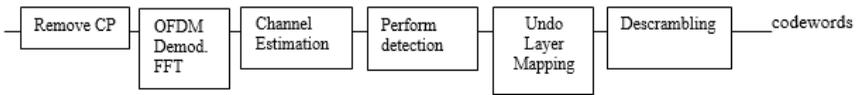


Fig. 25 Diagrama de bloques de recepción

VI.1.4. CONFIGURACIONES BÁSICAS UTILIZADAS.

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

Tabla 6 Configuraciones Generales

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

VI.2. ADAPTACIÓN DE NOMA AL SIMULADOR DE VIENNA.

VI.2.1 TRANSMISIÓN.

Se realiza un procedimiento similar a lo explicado en la simulación, como se puede observar en la Fig.26, 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 investigación 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_DLSCCH_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.27 (a, b, c).

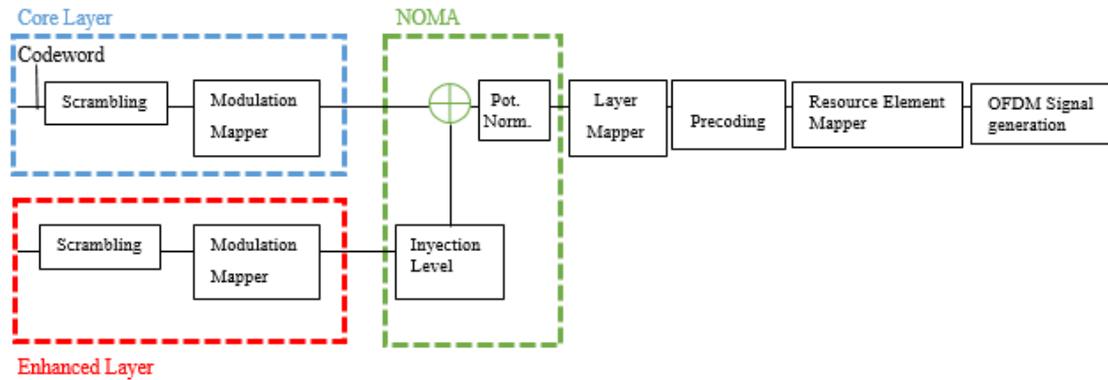


Fig. 26 Bloques de NOMA adaptados en transmisión.

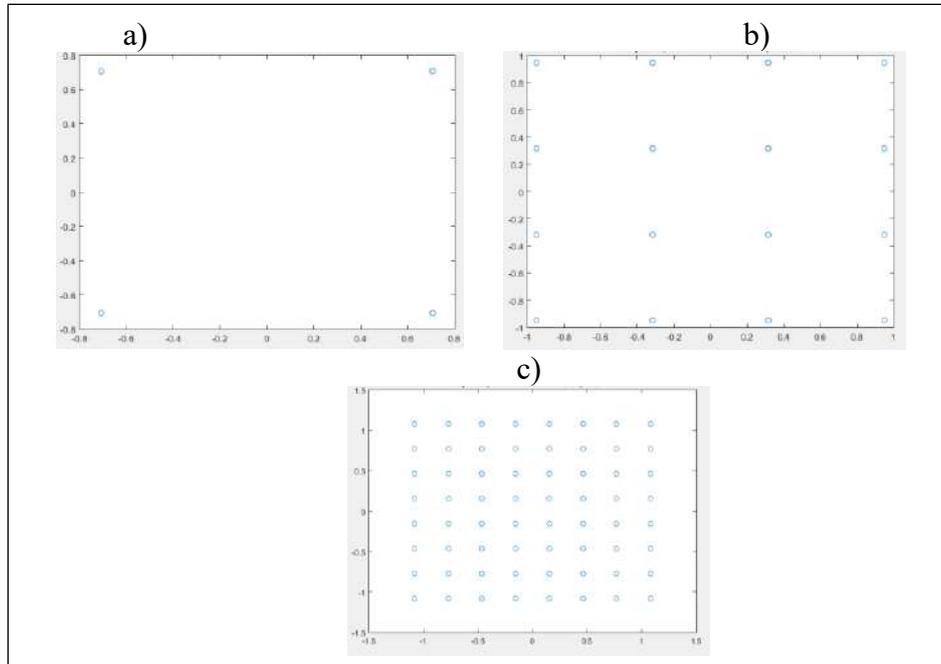
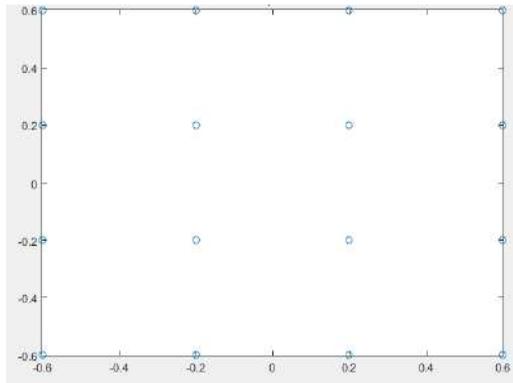


Fig. 27 Constelaciones de la capa CL y EL, a) QPSK, b) 16 QAM, c) 64QAM

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. 28.

a)



b)

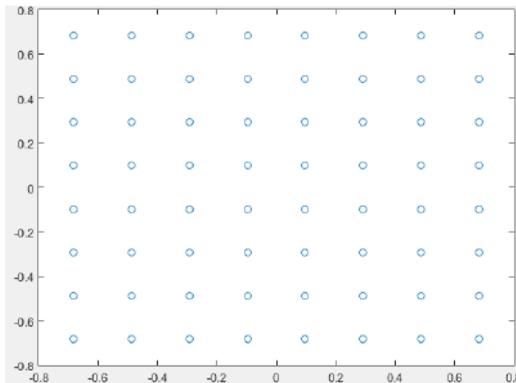


Fig. 28 Capa EL aplicado con un nivel de potencia de -4 dB a) 16 QAM, b) 64 QAM

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. 29, la suma de las capas se guarda en la variable `tx_user_symbols`.

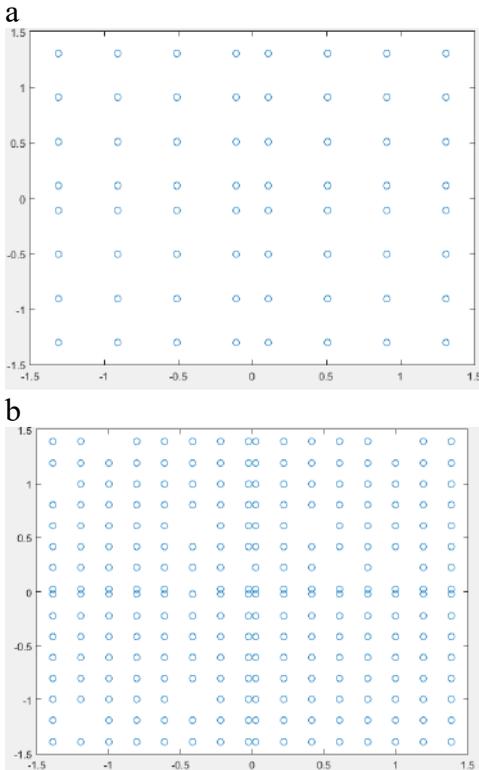
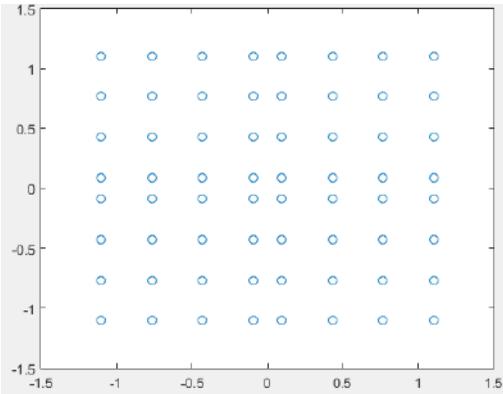


Fig. 29 Suma de capas CL+EL a) QPSK+16 QAM, b) QPSK+64QAM

Una vez realizada la suma de las capas, se normaliza la potencia a 1, su resultado se observa en la Fig. 30.

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

a



b

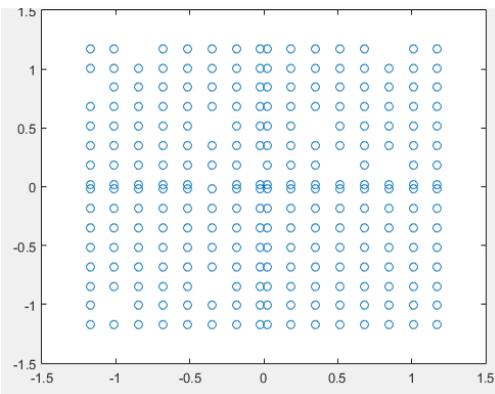
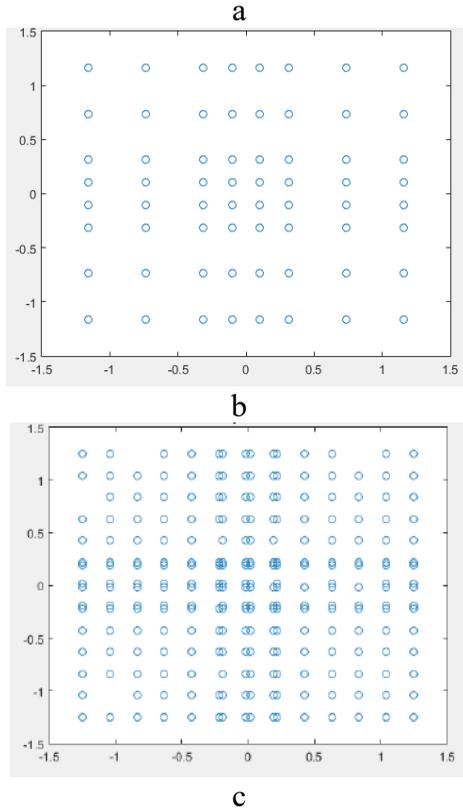
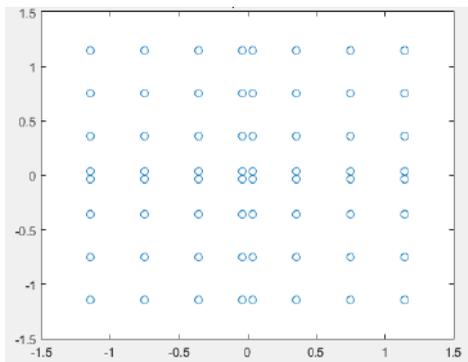


Fig.30 Suma de capas con potencia normalizada, a) con 16QAM, b) 64 QAM con potencia normalizada.

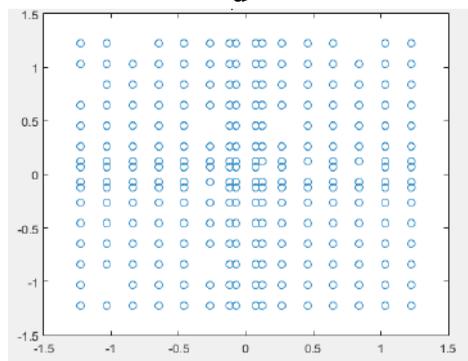
En la Fig. 31 se muestra la suma de capas con potencia normalizada a distinto IL.



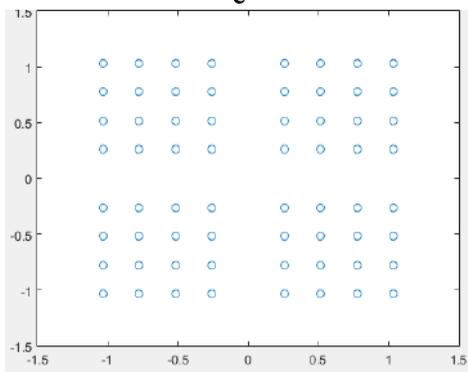
Evaluación del rendimiento de NOMA en sistemas LTE



d



e



f

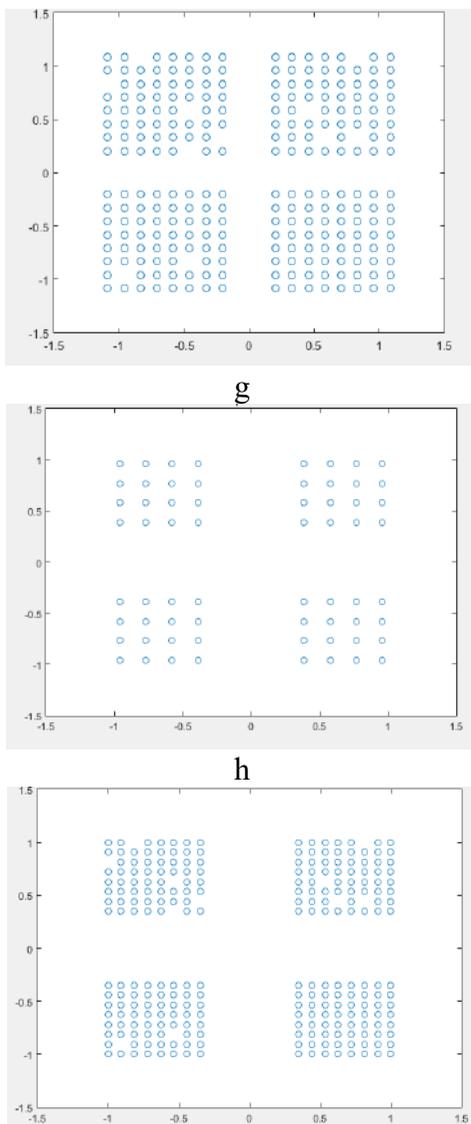


Fig. 31 Suma de capas con potencia normalizada, (a, c, e, g) son CL+EL(16QAM), (b, d, f, h) son CL+EL(64QAM).

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.

VI.2.2 RECEPCIÓN.

En la Fig. 32 se muestra el diagrama de bloques de la parte de recepción.

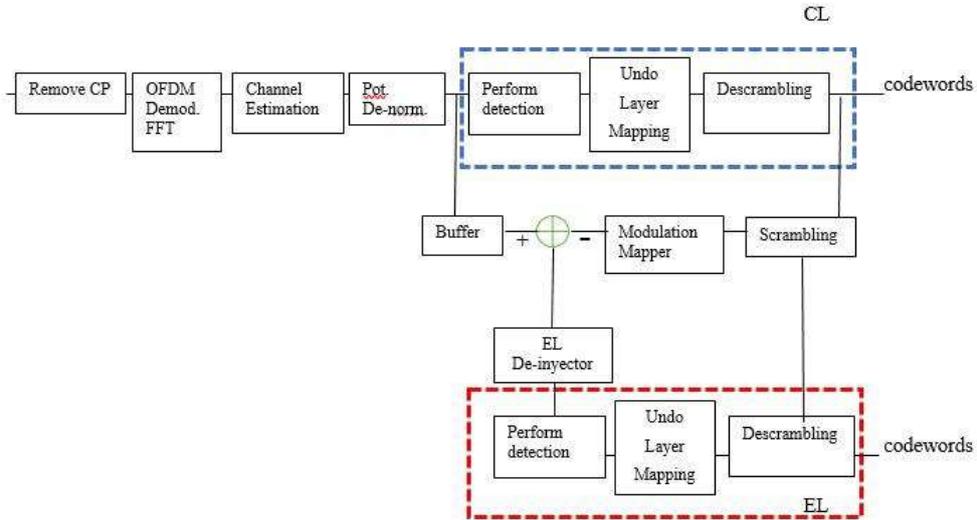


Fig. 33 Bloques de NOMA adaptados en recepción.

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 dematching*, *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:

$$\text{tx_user_symbols_EL} = \text{rx_user_symbols_c} - \text{tx_user_symbols_c} * H_{\text{est_user}}$$

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_SixO_EL`, en la cual se realiza la de-normalización y la utilización del demapper SSD.

La de-normalización se realiza de la siguiente manera:

$$g = 10^{-(\text{LTE_params.scheduler_EL.Iny_level}/20)}$$

$$\text{symbol_alphabet} = \text{symbol_alphabet} * \sqrt{g^2/(1+g^2)};$$

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_DL_SCH_decode`, dentro de esta función se aplica un *rate dematching*, *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`.

VI.2.3 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 Λ_l , 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 σ^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 σ .

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 σ .

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
```

a) 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. 34, 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. 35 del demapper SSD se corroboran en [18] en el capítulo 8.2.2.

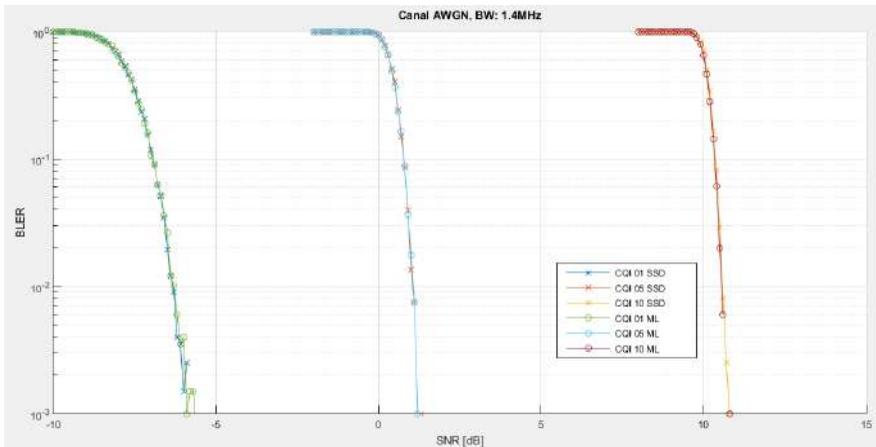


Fig. 34 Demappers ML, SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal AWGN

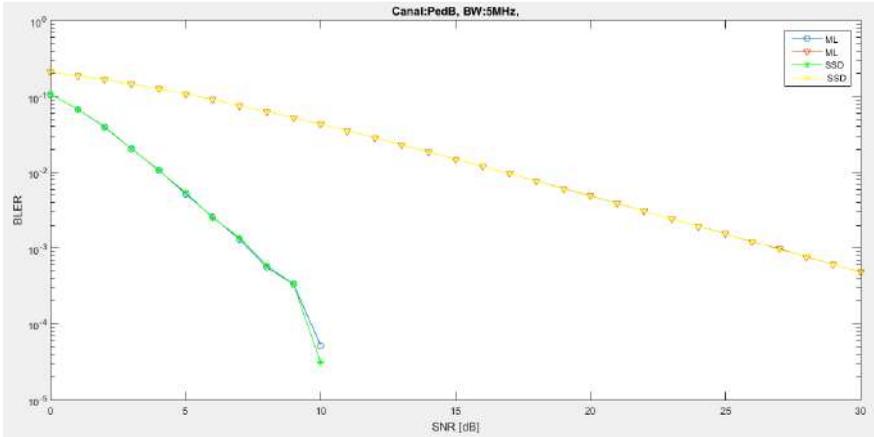


Fig. 35 Demappers ML, SSD en un sistema FDM/TDM, en un canal PedB

VI.2.4 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
Inyección 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

VII. ESTUDIO DE LOS DEMAPPERS

VII.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. 36 y Fig. 37, 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 Δ 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. 37 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).

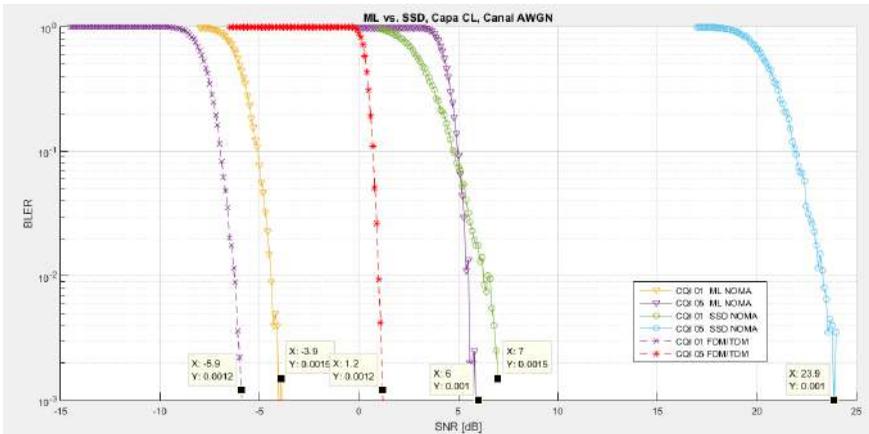


Fig. 36 Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa CL, en un canal AWGN

Evaluación del rendimiento de NOMA en sistemas LTE

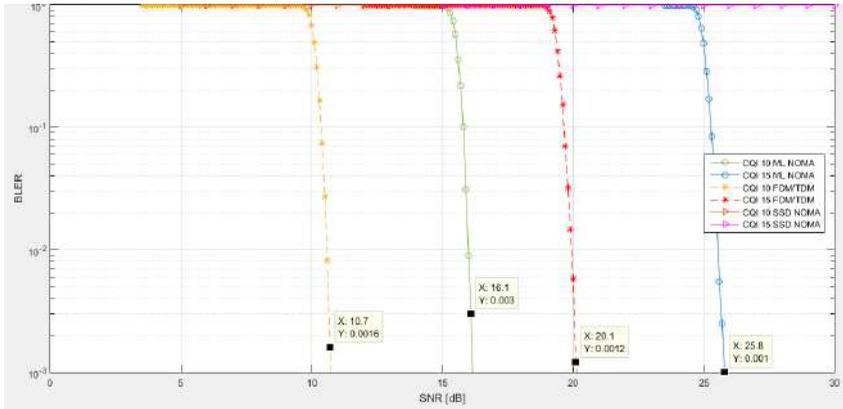


Fig. 37 Demapper ML vs SSD en NOMA de la capa EL, en un canal AWGN.

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

Tabla 8 Demapper SSD vs ML

En la Fig. 38 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.

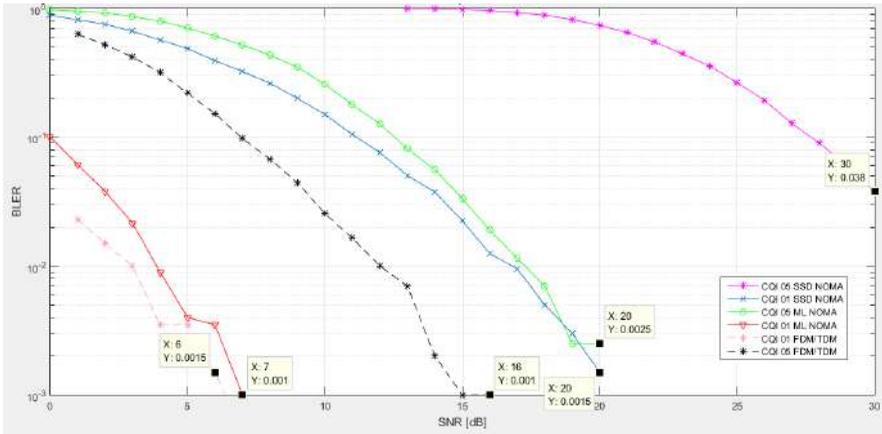


Fig. 38 Demapper ML vs SSD en NOMA, en un canal PedB.

VII.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.

VII.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.39 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.

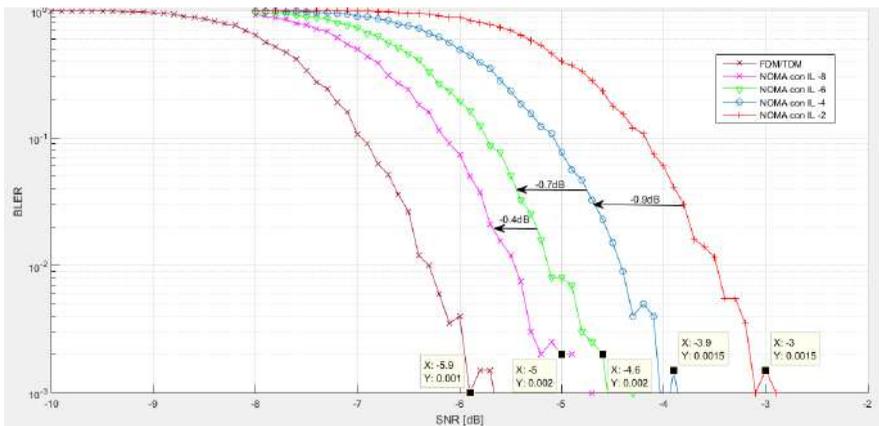


Fig. 39 Impacto del nivel de inyección en la capa CL

En la Fig.40 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.

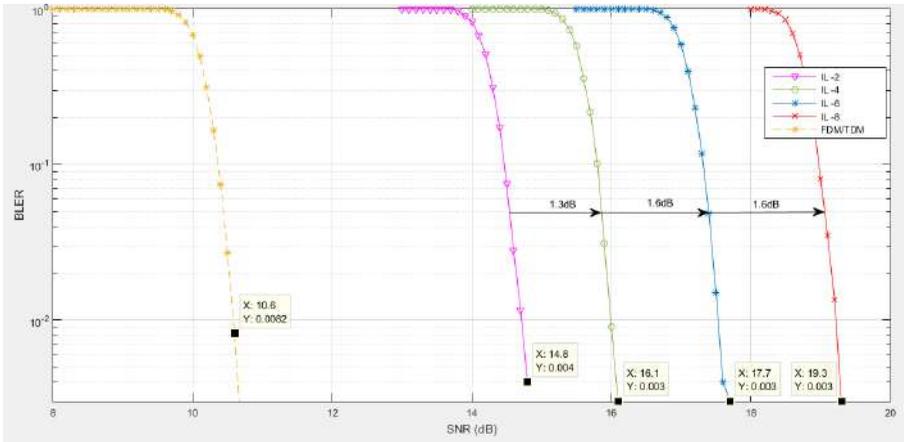


Fig. 40 Impacto del nivel de inyección en la capa EL

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 cómo 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

a) *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 $4dB$ 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 $2dB$, $3.6dB$, $4.8dB$, de SNR correspondientemente, tal y como se observa en la Fig. 41.

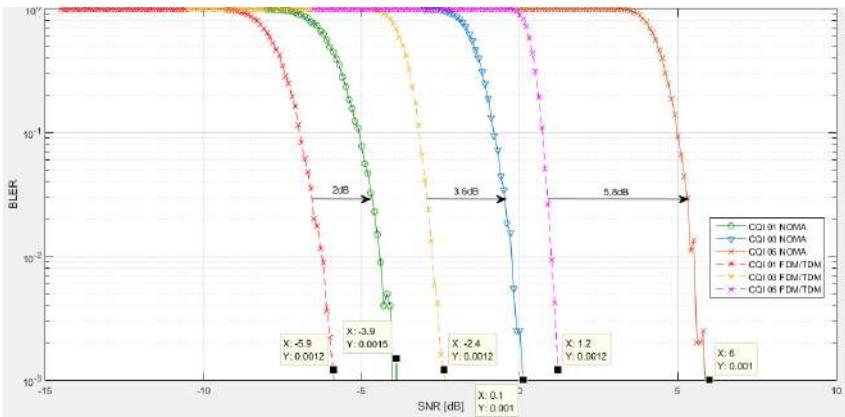


Fig. 41 Impacto del CQI de la capa CL

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.

VI.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 4dB 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 5.4dB, 5.4dB, 5.7dB, de SNR correspondientemente, tal y como se observa en la Fig. 42.

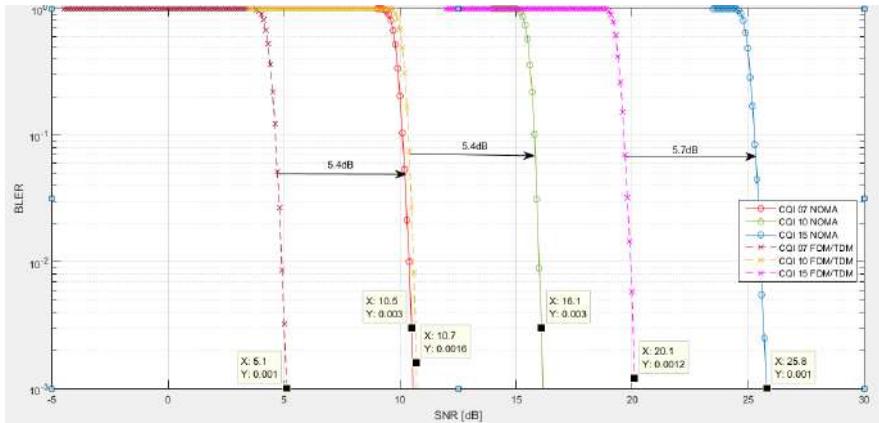


Fig. 42 Impacto del CQI de la capa EL

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.

VII.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.43 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. 43 se observa que la curva de NOMA del servicio móvil

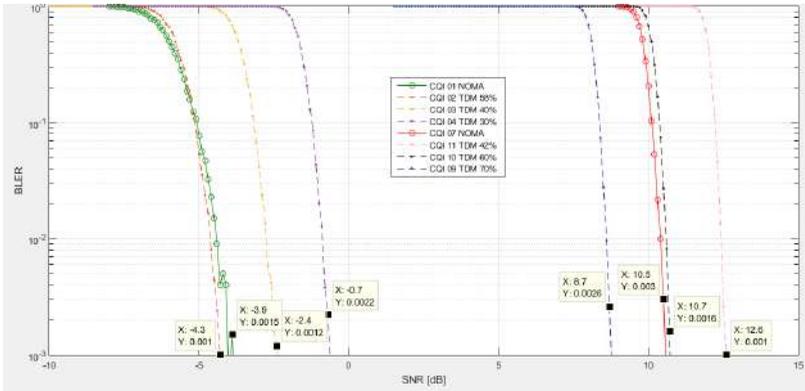


Fig. 43 Tasas de transmisión BAJAS de los servicios móviles y fijos.

En la Fig. 44 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.

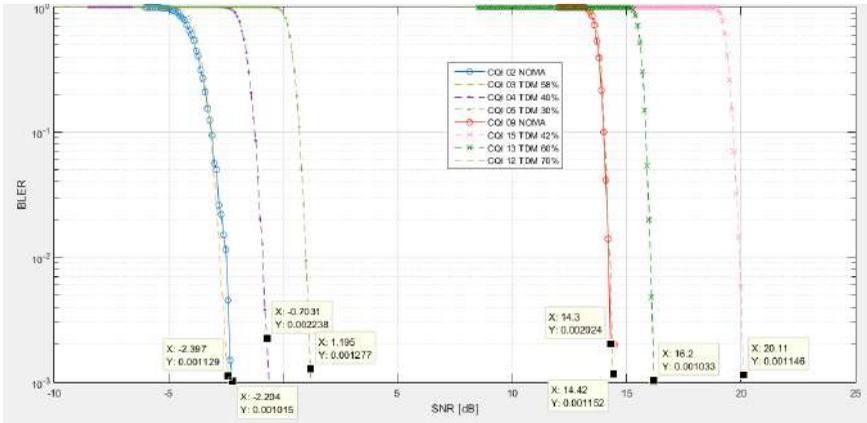


Fig. 44 Tasas de transmisión MEDIAS de los servicios móviles y fijos.

En la Fig. 45 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.

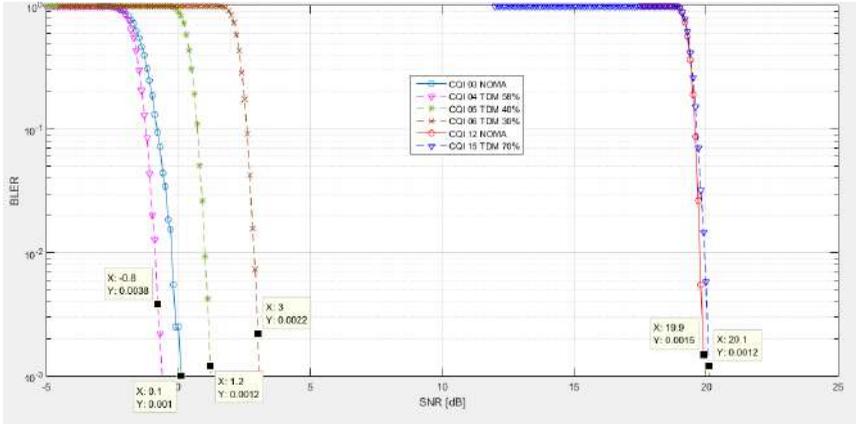


Fig. 45 Tasas de transmisión ALTAS de los servicios móviles y fijos.

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.

Evaluación del rendimiento de NOMA en sistemas LTE

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	SN R (dB)	Data rate	SN R	Data rate	SN R	Data rate	SN R (dB)
Tasa BAJA	cqi 1 0,1523 bps/hz QPSK 78 /1024	- 3,9 7	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 MEDI A	cqi 2 0,2344 bps/Hz QPSK 120 /1024	- 2,1 5	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	0,1 9	cqi 4 0,35 bps/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 MEDI A 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 MEDI A 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.

Tabla 11 Ganancia de Noma sobre TDM en un 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

VII.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.

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

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

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

VII.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 _m =1,2dB		SNR _m =1,2dB	
SNR _f =10,7dB		SNR _f =20,01dB	
1	CL=CQI capacidad=0,877bps/Hz	05	CL=CQI capacidad=0,877bps/Hz
	EL----		EL----
3 (IL=-6,1dB)	CL=CQI capacidad=0,6bps/Hz	04	CL=CQI capacidad=0,6bps/Hz
	EL=CQI capacidad=1,17bps/Hz	06	EL=CQI 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. 45a 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.

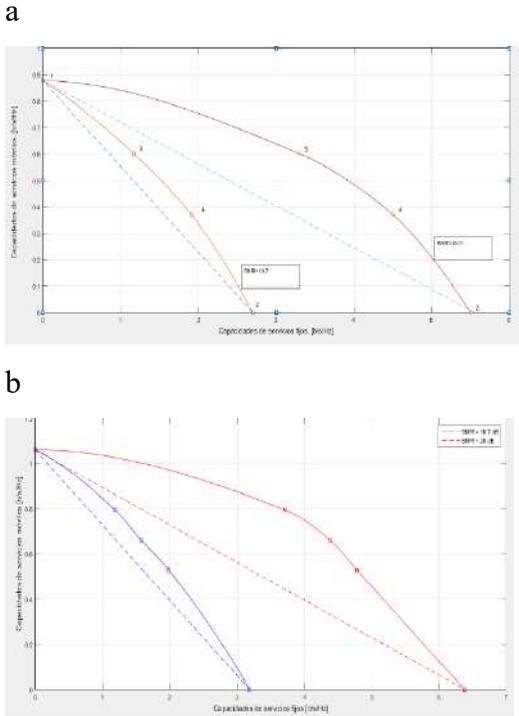


Fig. 46 a) Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en LTE. b) Capacidades alcanzables para los servicios móviles y fijos en ATSC 3.0.

La Fig.46b se obtiene de las combinaciones realizadas en la Tabla. 15.

ATSC 3.0		
	SNRm=1,2dB	SNRm=1,2dB
	SNRf=10,7dB	SNRf=20,01dB
1	CL=QPSK 8/15 capacidad=1,6bps/Hz	CL=QPSK 8/15 capacidad=1,6bps/Hz
	EL----	EL----
3 (IL=-6,7dB)	CL=QPSK6/15 capacidad=0,79bps/Hz	CL=QPSK6/15 capacidad=0,79bps/Hz

Evaluación del rendimiento de NOMA en sistemas LTE

	EL=64NUC3/15 capacidad=1,82bps/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
	EL=256NUC3/15 capacidad=1,57bps/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
	EL=256NUC3/15 capacidad=1,92bps/Hz	EL=64NUC12/15 capacidad=4.78bps/Hz
2	CL--	CL--
	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. 46b. 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_m de 1.2 dB y SNR_f 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_f 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.

VIII. LTE, IOT EN LA SEGURIDAD INDUSTRIAL

En la actualidad LTE es una de las redes mas utilizadas a nivel mundial, debido a su popularidad y grandes anchos de banda se torna como una gran base para la implementación de dispositivos IoT aplicados a una gran cantidad de situaciones, pero en el caso de estudio de nuestro libro, se verán las aplicaciones en la seguridad industrial.

Antes de empezar con el análisis, veremos los conceptos de IoT y de seguridad industrial.

VIII.1. IOT

IoT proviene del término inglés “internet of things” o en español “internet de las cosas” la que tiene distintas definiciones y arquitecturas establecidas por organizaciones de estandarización, grupos de Investigación, comunidades académicas, organizaciones nacionales, fabricantes, entre otros.

En tal sentido, tomando como base las definiciones determinadas por la Unión Internacional de Telecomunicación – ITU [20], el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica – IEEE [21] y el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet – IETF [22], se propone la siguiente definición para el internet de las cosas:

“Red global que conecta objetos identificables con capacidades de detección, actuación, procesamiento y comunicación con otros

dispositivos, centro de datos o nubes computacionales empleando tecnologías de comunicación e información, con el propósito de obtener aplicaciones avanzadas e información productiva”

Se detalla a continuación, las principales características correspondientes al Internet de las Cosas (IoT):

a) *Detección y actuación*: Los objetos poseen inteligencia embebida y cuentan con sensores para la detección y medición de variables físicas y actuadores para ejecutar acciones sobre otros elementos a su alrededor.

b) *Comunicación*: Los objetos establecen vínculos de comunicación empleando protocolos interoperables con otros objetos o aplicaciones y están disponibles de acuerdo a los requerimientos definidos por los usuarios.

c) *Procesamiento*: La data obtenida por los objetos es procesada en centros de datos locales o en nubes computacionales, almacenados en bases de datos y analizados para obtener información útil para los usuarios.

d) *Aplicación*: La información se presenta a los usuarios finales a través de una interfaz gráfica mediante aplicaciones de software desarrollados para terminales computacionales fijos o móviles.

VIII.1.1. SENSORES Y ACTUADORES

En el primer nivel de la arquitectura IoT, se encuentran los sensores, actuadores y plataformas electrónicas encargadas de la adquisición de datos de las variables a ser monitoreadas

Existen diversos elementos de detección de parámetros y actuadores eléctricos. A continuación, se presentan los elementos más representativos para aplicaciones agrícolas:

a) *Termocuplas*: Son dispositivos empleados para medir temperatura que producen pequeñas señales, generalmente en el orden de los microvoltios. Constan de dos materiales que al medir una misma temperatura producen un diferencial de voltaje independiente uno del otro. La diferencia entre los voltajes tiene una relación no lineal con la temperatura. La magnitud del voltaje depende del metal elegido. Son adecuados para la medición de amplios rangos de temperatura. Están codificados por colores para diferentes metales y etiquetados por tipo. Pueden ser utilizados en ambientes industriales y de alta temperatura [23]

b) Sensor de matriz granular (GMS) Es un dispositivo resistivo que responde a los cambios en la humedad del suelo. Contiene dos electrodos con una sustancia granulada mezclada con yeso que evita que los fertilizantes y iones del suelo afecten la medición. A medida que el agua ingresa al sensor, la resistencia entre los electrodos se reduce. Cuando el sensor se seca, la resistencia se eleva. La relación

entre la resistencia eléctrica y la humedad del suelo se determina mediante fórmulas calculadas por el fabricante del sensor [24].

c) *Detectores de infrarrojo no disperso (NDIR)* Son detectores empleados para la medición de concentraciones de óxidos de carbono (CO y CO₂). Su operación se fundamenta en la medida del total de luz infrarroja que absorbe una muestra de gas a una determinada frecuencia. De acuerdo a la cantidad de luz infrarroja absorbida, el detector determina la concentración volumétrica del gas en la muestra. Se utiliza una rueda calibrada frente al detector para corregir el desplazamiento en la medición y la ganancia del analizador [25].

d) *Electrodo selectivo de iones* Es utilizado para establecer el total de iones en un medio acuoso por medio de la medición del potencial eléctrico. Se emplea una membrana selectiva en un electrodo selectivo de iones que únicamente permite el ingreso o salida del ión requerido. En el equilibrio, existe una diferencia de potencial entre los dos lados de la membrana que está determinada por la concentración de la solución. La diferencia del potencial medido está en función del logaritmo concentrado del ión [26].

e) *Válvula solenoide* Es un dispositivo de actuación electromecánica que controla el flujo de líquidos o gases. Contiene una bobina con un núcleo ferromagnético en su centro denominado solenoide. El núcleo, o émbolo, cierra un orificio en reposo. Cuando

se aplica una corriente eléctrica, la bobina crea un campo magnético que atrae al émbolo a su centro y libera el orificio para permitir el paso del fluido o gas [27].

En el segundo nivel de la arquitectura IoT, se encuentran las tecnologías de radio de bajo consumo de energía desarrolladas específicamente para servicios del internet de las cosas.

VIII.2. SEGURIDAD INDUSTRIAL

La seguridad industrial abarca desde problemas técnicos hasta diversos tipos de efectos humanos y sociales. Debe ser una disciplina de estudio que mejore el nivel de impartición lectiva, como la comprensión de la fenomenología asociada a los riesgos industriales.

La seguridad industrial es el conjunto de normas obligatorias establecidas para prevenir y proteger de los accidentes laborales. Es decir, de todo aquello que pueda producir daños a las personas, a los bienes o al medioambiente de la empresa o institución. Pues, las maquinarias y herramientas que se utilizan son áreas propensas al peligro. Por lo tanto, mediante esta prevención se busca minimizar al máximo cualquier tipo de accidente laboral. Aunque también cubre la investigación de accidentes en caso de presentarse.

Este tipo de seguridad industrial se debe cumplir obligatoriamente en todas las empresas. Su finalidad consiste en brindar seguridad al trabajador dentro del ámbito laboral, así como

prevenir lesiones o accidentes de trabajo en los entornos industriales. De esta manera, el trabajador se siente seguro y libre de riesgos y es capaz de mantener la confianza en el trabajo que ejerce.

Normas y condiciones

Cualquier empresa o industria debe saber cuál es su responsabilidad con sus trabajadores para garantizar su seguridad y protección. Para ello, debe hacer que sus empleados cumplan una serie de normas y condiciones que reduzcan el riesgo de sufrir un accidente laboral.

Abastecimiento de protección personal

Todos los trabajadores deben estar equipados de indumentaria apta e indicada para realizar sus actividades laborales de forma segura. Para ello, se necesita usar cascos industriales, botas, guantes, arnés, máscaras, gafas de seguridad y otras herramientas proporcionadas por la empresa que ayuden a disminuir el riesgo de padecer accidentes laborales. Estos equipos se seleccionan de acuerdo con la ocupación y los riesgos específicos.

Garantizar un área de trabajo segura

Es imprescindible que los centros de trabajo estén bien preparados para no ser un peligro para los trabajadores. Estos deben disponer de salidas de emergencias accesibles, zonas de paso amplias y libres de obstáculos para evitar embotellamiento. También debe

haber salidas debidamente señalizadas, tener un sistema contra incendios y poseer un plan para casos de emergencia. Además, el área debe estar correctamente iluminada y los pisos no pueden ser irregulares ni resbaladizos. Y por último pero no menos importante, las maquinarias deben tener una distancia de separación suficiente para que el personal puedan realizar su trabajo cómodamente.

Brindar capacitación

Es fundamental que los trabajadores obtengan una formación adecuada. De esta manera, podrán adquirir los conocimientos necesarios para desempeñar su labor de forma segura y competente. Y, a la vez, estarán capacitados para utilizar correctamente cualquier elemento de seguridad.

VIII.3. IOT Y LTE

Tecnologías LPWAN Existen diversas tecnologías LPWAN para aplicaciones del Internet de las Cosas. Las principales son las siguientes [28].

a) LoRaWAN Es una LPWAN que puede lograr un alcance en zonas urbanas de hasta 5 kilómetros y en zonas suburbanas hasta los 20 kilómetros de distancia. Puede lograr una velocidad de datos en bits hasta de 50 kbps. No tiene limitaciones en la cantidad de mensajes a enviar por día tanto en el uplink como en el downlink. El servicio de

la red puede ser realizada mediante un despliegue propio de infraestructura o contratada a una empresa particular.

b) Sigfox Es una LPWAN creada por una compañía de Francia que opera en rangos de frecuencia que no requieren licencia y tiene un alcance en zonas urbanas de hasta 10 kilómetros. Utiliza modulación BPSK en anchos de banda muy estrechos de cien hercios. Alcanza velocidades de datos de 100 bps y la carga útil en el uplink es de 12 bytes y en el downlink es de 8 bytes. La cantidad máxima de mensajes que se puede enviar por día en el uplink es de 140 y en el downlink es de 4. Para el empleo de la red es necesaria la existencia de un operador en el ámbito geográfico de interés y la contratación de los respectivos servicios.

c) Narrow-Band IoT (NB-IoT) Es normada por el Proyecto de Asociación de 3^o Generación y opera en bandas de frecuencia licenciadas asignadas a la telefonía móvil. El alcance que logra es de hasta 1 kilómetro en zonas urbanas y utiliza la modulación QPSK. Puede desplegarse en anchos de banda de 200 kHz de forma autónoma, en bandas de guarda o dentro de una banda de una portadora LTE. Puede lograr velocidades de hasta 200 kbps, una carga útil de 1600 bytes y para su utilización se requiere la presencia de una empresa de comunicaciones móviles que brinde el servicio en la zona geográfica de interés.

d) LTE-M Es otra LPWAN normada por la 3GPP. Logra un alcance superior a NB-IoT, llegando hasta los 5 kilómetros en zonas urbanas. Utiliza las modulaciones QPSK y 16QAM sobre un espectro de 1.4 MHz. La tasa de transmisión que logra es de 1 Mbps y al igual que NB-IoT, el servicio es brindado por un operador de telefonía móvil.

VIII.4. APLICACIONES

Con la irrupción en la última década de la Industria 4.0, la seguridad y salud ocupacional se enfrenta a un nuevo escenario y paradigma [29]. Como sostienen Adriaensen et al. [30], se deberán introducir nuevas metodologías para la investigación de accidentes laborales basados en sistemas adaptativos complejos con el objeto de evaluar los peligros cambiantes introducidos en esta cuarta revolución industrial.

La seguridad y salud laboral es posiblemente uno de los aspectos más importantes en toda empresa, y con la nueva revolución industrial es esencial establecer un foco de atención a este aspecto que se ha dejado atrás. Badri et al. [31], establecen como punto de partida las denominadas cuatro facetas esenciales de la seguridad y salud laboral que son según estos autores: organización del trabajo, estructura legislativa y regulatoria, sistemas de gestión y gestión de riesgos. Se erige entonces la preocupación que existe en cuanto al

manejo de la seguridad industrial en la nueva era digital. Se trata de dar respuesta al reto que supone la Industria 4.0 para la seguridad y salud ocupacional.

La automatización conlleva una nueva forma de organizar y realizar el trabajo, que, si bien por un lado representa un reto, por otro lado supone una oportunidad, pues de esta forma los trabajadores van a estar envueltos en actividades más interesantes, que requieren mayor creatividad, que dan un mayor valor agregado, y tendrán la oportunidad de enriquecer su trabajo con calidad, dejando de lado rutinas monótonas y adquiriendo mayor autonomía y autodesarrollo [32].

La implementación de tecnologías como lo pueden ser la realidad virtual, la inteligencia artificial, robots, y muchos más, permiten hacer a la actividad laboral más segura y saludable porque a través de la misma se pueden llevar a cabo una detección temprana y constante de los posibles riesgos, además de que también permiten su manejo a través de “tecnologías inteligentes de seguridad e ingeniería virtual” [33].

Partiendo de ambas perspectivas, seguridad y salud laboral competente digitalmente y de un escenario productivo mejorado, los sistemas de robots colaborativos adaptativos van a monitorear la carga

física y cognitiva de los trabajadores, y van a trabajar de manera proactiva para evitar una sobrecarga del trabajador [34].

Para poder cumplir con esta finalidad, será imprescindible el uso de sensores corporales, individuales y portátiles que reciban señales de entrada, tales como movilidad del operario y conductas físicas (con el uso de acelerómetros y giroscopios), presión sanguínea, ritmo cardíaco, u otros factores convirtiéndose en una fuente de información relevante.

A través del uso de estos sistemas de inteligencia artificial, se analizan los datos obtenidos y realizan un análisis para tomar decisiones sobre su funcionamiento, adaptándolo con la finalidad de ayudar a mejorar el estatus cognitivo y físico del operador.

Esta tecnología permite hacer frente a los problemas derivados de la interacción humano-robot en la realización de tareas, que de no adecuarse correctamente puede representar ciertos riesgos al trabajador, e incluso también puede llevar a malos funcionamientos de las máquinas, por lo cual, será esencial monitorear este aspecto. Haciendo uso de todos los datos y análisis previo, el robot colaborativo adaptativo adecuará entonces su forma de funcionamiento para adaptarlo al operario y así evitar el impacto negativo sobre los mismos [35].

En general, esta tecnología da soporte a los trabajadores constantemente a lo largo de la realización de sus distintas labores, dado que permiten monitorear el estatus del mismo en todo instante para así poder adaptar, el proceso que se esté llevando a cabo, de forma personalizada a cada trabajador acorde a sus capacidades y habilidades, es decir, dando respuesta a sus necesidades.

Equipamiento de protección individual inteligente Desde una perspectiva de un escenario de seguridad y salud laboral digitalmente habilitada, está surgiendo una nueva generación de Equipos de Protección Individual, los denominados EPIs inteligentes [36]. Se habla de “vestimenta inteligente”, la cual viene incorporada con distintos sensores, a través de los que se obtiene información a tiempo real sobre varios parámetros del entorno laboral y de los puestos de trabajo realizando mediciones de temperatura, humedad, luminosidad, ruidos, vibraciones, movimientos, y otros aspectos que permitan determinar y poder hacer seguimiento a la salud del trabajador en cada instante.

Estas tecnologías pretenden leer cualquier información que pueda ser relevante en cuanto al entorno de trabajo de un operario, con la finalidad de protegerlo activamente, y no pasivamente, es decir, pretende evitar que ocurra el accidente y no solo reducir el impacto del

mismo. Dicho de otro modo, se plantea eliminar los riesgos desde su origen con la finalidad de que no se materialicen.

Además, no solo cumplen un rol en la prevención de accidentes, sino que también desde el punto de la productividad juega un papel importante, dado que haciendo uso de estos se facilita el intercambio de información y la comunicación a tiempo real con otros operarios. Asimismo, incrementa la capacidad del trabajador para enfrentar distintas situaciones que puedan surgir durante la actividad laboral [37].

Además de las mencionadas previamente, existe otro gran número de nuevas tecnologías para la seguridad industrial 4.0 que cada día se desarrollan, se perfeccionan e incrementan en número y variedad. Los sistemas son cada vez más avanzados y complejos, sin embargo, al mismo tiempo pasan a ser más eficientes e importantes.

Como se ha expuesto, existen muchas más tecnologías que de darse un correcto uso prometen ser esenciales en la seguridad, rentabilidad, productividad y eficiencia de las empresas y de sus trabajadores.

IX. CONCLUSIONES

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 las 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.

LTE es una red idónea para la aplicación de tecnologías de IoT enfocadas a la Salud y Seguridad Industrial.

Se abre un nuevo campo de investigaciones al encontrar aplicaciones de seguridad industrial con IoT y la industria 4.0

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. Mehl'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; Yiyan 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.
- [20] International Telecommunication Union. (2012). Overview of the Internet of things. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-E&type=items
- [21] Internet Engineering Task Force. (2019). The Internet of things, de <https://www.ietf.org/topics/iot/>
- [22] Minerva, R., Biru, A., & Rotondi, D. (2015). Towards a definition of the Internet of Things (IoT). IEEE Internet of Things, 1, 72–75.

https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf

- [23] Lea, P. (2018). *Internet of Things for Architects*. Packt Publishing Ltd. (1a ed.). Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- [24] Mancuso, C. (2005). Using granular matrix soil moisture sensors. <http://aecdatalog.com/irrigation/gms/>
- [25] Cambustion Ltd. (2019). Nondispersive Infrared Detector (NDIR) principle | Cambustion. <https://www.cambustion.com/products/ndir500/operating-principle>
- [26] Raja, P., & Barron, A. (2019). *Ion Selective Electrode Analysis - Chemistry*. LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Book%3A_Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_\(Barron\)/01%3A_Elemental_Analysis/01.7%3A_Ion_Selective_Electrode_Analysis](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Book%3A_Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/01%3A_Elemental_Analysis/01.7%3A_Ion_Selective_Electrode_Analysis)
- [27] Tameson B.V. (2019). Solenoid valve types. <https://tameson.com/solenoid-valve-types.html>
- [28] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- [29] Liu, Z., Xie, K., Li, L., & Chen, Y. (2020). A paradigm of safety management in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 632-645.
- [30] Adriaensen, A., Decré, W., Pintelon, L. (2019). Can Complexity-Thinking Methods Contribute to Improving Occupational Safety

- in Industry 4.0? A Review of Safety Analysis Methods and Their Concepts. *Safety*, 5(4), 65.
- [31] Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403-411.
- [32]. Leso, V., Fontana, L., & Iavicoli, I. (2018). The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *La Medicina del lavoro*, 110(5), 327-338.
- [33] Mohammadfam, I., Kamalinia, M., Momeni, M., Golmohammadi, R., Hamidi, Y., & Soltanian, A. (2017). Evaluation of the quality of occupational health and safety management systems based on key performance indicators in certified organizations. *Safety and health at work*, 8(2), 156-161.
- [34] Frank, A., Dalenogare, L., Ayala, N. (2019). Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics*, en prensa. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- [35] Weber, A. (2018). Collaborative Robot Do's and Don'ts. Tomado el 22 de Abril del 2020, en la página web <https://www.assemblymag.com/articles/94459-collaborative-robot-dos-and-donts>
- [36] Brown, P. (2017). Wearable Tech for the Construction Industry. Tomado el 24 de Abril del 2020, de la página web <https://electronics360.globalspec.com/article/9669/wearable-tech-for-the-construction-industry>
- [37] Erol, M. (2019). Occupational health and work safety systems in compliance with industry 4.0: research directions. *International Journal of Ebusiness and Egovernment Studies*, 11(2), 121-133. doi: 10.34111/ijebe.20191123

LOS AUTORES

NÉSTOR AUGUSTO ESTRADA BRITO



Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba en 2015, Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones en la Universidad Politécnica de Valencia de España-Valencia en 2017.

Estudiante del grado de Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación en la Universidad Internacional de la Rioja. Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo (2018-2020), Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (2020 - actualidad). Investigador en el grupo de investigación GIKS de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Autor de 4 artículos científicos. Miembro del proyecto de investigación en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago.

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA



Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones (UNACH, 2012), Magíster en Redes de Comunicaciones (PUCE, 2015). Candidato a Doctor en Ciencias Informáticas (UNLP, Argentina). Candidato a Doctor en Ingeniería (UNLP, Argentina). Es becario SENESCYT. Fue parte del grupo de investigadores del Instituto de investigación ICITS de la UNACH. Fue Docente de la UNACH desde el 2013 hasta el 2016. En la UEB fue Docente Investigador y Administrador de la Red de Telecomunicaciones desde el 2016 hasta el 2019. Se ha desempeñado como Docente Investigador en la ESPOCH durante el 2021. Y ha sido director de tesis de maestría en la ESPOCH y PUCE. Desde el 2019 es Investigador doctoral del Instituto LEICI del CONICET – UNLP Argentina. Ha publicado más de 30 obras de relevancia a nivel nacional e internacional, incluida varias publicaciones en SCOPUS. Sus intereses de investigación son informática forense, preservación digital de datos, procesamiento estadístico de señales, redes de comunicaciones, educación.

SANTIAGO ISRAEL LOGROÑO NARANJO



Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba en 2015, Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones en la Universidad Politécnica de Valencia - España (2018), Auxiliar de Telecomunicaciones / Empresa Eléctrica Riobamba S.A (2016-2017), Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Sede Orellana (2019 - actualidad). Investigador subrogante en el grupo de investigación Tecnología Informática Aplicada (INFOSO) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Orellana. Miembro de proyecto de investigación y vinculación en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Orellana. Autor de artículos científicos.

JOSÉ HERNÁN NEGRETE COSTALES



Ingeniero Agrónomo. Técnico Superior Laboratorista Naturópata, Magister en Seguridad Industrial Mención Prevención de Riesgos y Salud Ocupacional. Técnico Agrícola en el Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario - INDA (2000-2002). Responsable del Proyecto Jambi Kiwa (2002-2003). Docente del Instituto Tecnológico Superior Doctor Misael Acosta Solís (2002-2013). Docente del Instituto Tecnológico Superior Riobamba (2004-2013). Técnico Docente y Responsable de la Estación Agrometeorológica de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – ESPOCH (2013-2018). Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - ESPOCH (2018-actualidad). Investigador activo del grupo de investigación IITMS. Miembro de proyectos de investigación y vinculación. Miembro de comisiones de Carrera y de Evaluación de la Calidad de la carrera de Minas e Ingeniería Ambiental. Coordinador de la carrera de Ingeniería en Minas de la ESPOCH - Sede Morona Santiago.



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACCESO MÚLTIPLE NO-ORTOGONAL (NOMA) EN SISTEMAS LTE (LONG TERM EVOLUTION)

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 a 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. Así también se hace una revisión de las aplicaciones de la telefonía celular, principalmente de LTE en la seguridad industrial.

investigacioni2d.com/editorial/

✉ info@investigacioni2d.com

📍 Riobamba, Ecuador

ISBN: 978-9942-8986-3-0



9 789942 898630