

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***ESTUDIO DEL RENDIMIENTO DE LA  
TECNOLOGÍA NON-ORTHOGONAL  
MULTIPLEXING ACCESS PARA  
MÚLTIPLES CAPAS***

**Alumno** *Pujana Sanchez, Gorka*  
**Director** *Angueira Buceta, Pablo*  
**Departamento** *Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones*  
**Curso académico** *2018/2019*

*Bilbao, a 23 de septiembre de 2019*

## Resumen

La multiplexación por división en capas (Layered Division Multiplexing, LDM), también conocido como acceso múltiple no-ortogonal (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), es una novedosa técnica de acceso basada en la multiplexación por potencia. Su uso ha sido aplicado recientemente en el estándar ATSC 3.0, empleando dos capas en la transmisión de la televisión digital terrestre (TDT) para ofrecer servicios móviles y fijos [1][2]. Es decir, hasta ahora se ha limitado la capacidad de LDM en el empleo únicamente de dos capas. El objetivo principal de este proyecto, es extender la investigación a múltiples capas para evaluar su potencial. Para ello, se ha implementado el análisis teórico [3] en una herramienta de simulación, la cual ha permitido conseguir unos resultados para adquirir una primera idea de su rendimiento. En primer lugar, se presenta tanto la arquitectura definida para el sistema de comunicaciones, como el desarrollo de la herramienta y, a continuación, las conclusiones obtenidas a partir de las simulaciones realizadas con la herramienta implementada. Finalmente, se presentan nuevos escenarios de aplicación que podrían aprovechar este caso.

**Palabras clave:** LDM, NOMA, Radiocomunicación

## Laburpena

Geruzatan zatitutako multiplexazioa (Layered Division Multiplexing, LDM), atzipen ez ortogonal anitza (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) bezala ere ezaguna, potentziarekiko multiplexazioan oinarritutako atzipen teknika berria da. Bere erabilera ATSC 3.0 estandarrean aplikatu berria da lurreko telebista digitalerako, bi geruza erabiliz zerbitzu mugikorak eta finkoak eskaintzeko [1] [2]. Hau da, orain arte LDMren kapazitatea bi geruzatara baino ez da mugatu. Proiektu honen helburu nagusia, ikerketa geruza anitzetara zabaltzea da bere potentziala hausnartzeko. Horretarako, ikerketa teorikoa [3] simulazio-erreminta batean inplementatu da. Lortutako emaitzekin, errendimenduari buruzko lehenengo ideia batera iritsi ahal izan da. Lehenik eta behin, komunikazio-sistamarako definitutako arkitektura zein erremintaren garapena aurkezten da. Ondoren, garatutako erremintarekin lortutako emaitzetan oinarritutako ondorioak. Eta azkenik, garapen honetaz baliatu daitezkeen egoera berriak aurkezten dira.

**Hitz-gakoak:** LDM, NOMA, Irrati-komunikazioa

## Abstract

Layer division multiplexing (LDM), also known as non-orthogonal multiple access (NOMA), is a novel access technique based on power multiplexing. Its use has recently been applied in the ATSC 3.0 standard, using two layers in the transmission of digital terrestrial television (DTT) to offer mobile and fixed services [1] [2]. Until now, the capacity of LDM has been limited to the use of two layers. The main goal of this project is to extend the research to multiple layers to evaluate its potential. Therefore, the theoretical analysis [3] has been implemented in a simulation tool, which has allowed to obtain the results to acquire a first idea of its performance. First of all, both, the architecture defined for the communications system and the development of the tool are presented. Then, the conclusions obtained from the simulations, which have been carried out with the developed tool are presented. Finally, new application scenarios that could benefit of this case are proposed.

**Key words:** LDM, NOMA, Radiocomunication

## Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos y alcance del trabajo.....	3
2.1. General .....	3
2.2. Específicos .....	3
3. Beneficios.....	4
3.1. Técnicos .....	4
3.2. Económicos .....	4
3.3. Sociales.....	5
4. Análisis del estado del arte.....	6
4.1. Layered Division Multiplexing .....	6
4.1.1. Conceptos básicos .....	6
4.1.2. Arquitectura del sistema de comunicación.....	7
4.1.2.1. Transmisor LDM.....	7
4.1.2.2. Receptor LDM.....	8
4.1.3. Configuraciones del sistema.....	9
4.2. Asynchronous N-Layered Division Multiplexing (N-LDM) .....	11
5. Metodología.....	14
5.1. Definición de la arquitectura para el sistema de comunicación .....	14
5.1.1. Sistema transmisor .....	15
5.1.1.1. Fuente de información.....	15
5.1.1.2. Codificador/Decodificador LDPC.....	15
5.1.1.3. Entrelazado/Desentrelazado .....	16
5.1.1.4. Modulación/Demodulación .....	16
5.1.1.5. Multiplexador LDM .....	16
5.1.1.6. Modulador/Demodulador OFDM.....	16
5.1.2. Propagación .....	17
5.1.3. Sistema receptor .....	17
5.1.3.1. Demultiplexador LDM.....	18
5.1.3.2. Receptor de datos .....	18
5.2. Desarrollo de la herramienta de simulación .....	19
5.2.1. Sistema de transmisión de la señal .....	19
5.2.1.1. Fuente de información.....	20
5.2.1.2. Codificador LDPC.....	20

5.2.1.3.	Modulador .....	21
5.2.1.4.	Multiplexador LDM .....	21
5.2.1.5.	Entrelazado .....	22
5.2.1.6.	Codificador OFDM .....	22
5.2.1.7.	Salida transmisor .....	24
5.2.2.	Canal de propagación .....	24
5.2.3.	Sistema de recepción de la señal .....	25
5.2.3.1.	Demodulador OFDM.....	25
5.2.3.2.	Desentrelazado .....	26
5.2.3.3.	Demultiplexador LDM.....	26
5.2.3.4.	Demodulador .....	28
5.2.3.5.	Decodificador LDPC .....	29
5.3.	Criterios de evaluación del sistema .....	29
5.4.	Validación de la herramienta.....	30
5.5.	Definición de los escenarios .....	33
5.6.	Resultados .....	34
6.	Planificación.....	39
6.1.	Equipo de trabajo.....	39
6.2.	Definición de las fases y tareas de trabajo.....	39
6.3.	Hitos .....	42
6.4.	Unidades Entregables .....	43
6.5.	Diagrama de Gantt.....	40
7.	Presupuesto.....	41
7.1.	Recursos Humanos .....	41
7.2.	Amortizaciones.....	41
7.3.	Gastos .....	41
7.4.	Resumen económico.....	42
8.	Conclusiones .....	43
9.	Referencias .....	45
10.	ANEXO I: Resultados validación herramienta de simulación .....	47
11.	ANEXO II: Resultados simulaciones .....	47

## Tablas

Tabla 1: Code rate .....	20
Tabla 2: Modulación .....	21
Tabla 3: Parámetros ODFM para el modo 4K en un canal de 6 MHz .....	23
Tabla 4: Parámetros en el dominio del tiempo para el modo 4K en un canal de 6MHz .....	23
Tabla 5: Cálculo de la mínima intensidad de campo en un sistema DVB-T2 8 MHz a 650 MHz.....	34
Tabla 6: Bitrate útil (Mbit/s) para canales de 6 MHz.....	38
Tabla 7: Recursos Humanos.....	39
Tabla 8: P.T.1: Coordinación, gestión y supervisión del proyecto.....	39
Tabla 9: P.T.2: Estudios previos .....	40
Tabla 10: P.T.3: Desarrollo herramienta de simulación de un sistema de comunicaciones convencional .....	40
Tabla 11: P.T.4: Multiplexación LDM.....	41
Tabla 12: P.T.5: Simulaciones .....	41
Tabla 13: P.T.6: Análisis y evaluación de los resultados .....	42
Tabla 14: P.T.7: Documentación.....	42
Tabla 15: Hitos de control.....	42
Tabla 16: Unidades Entregables.....	43
Tabla 17: Coste unitario Recursos Humanos .....	41
Tabla 18: Presupuesto total horas internas .....	41
Tabla 19: Amortizaciones .....	41
Tabla 20: Gastos.....	41
Tabla 21: Resumen presupuesto final.....	42
Tabla 22: IL mínimo entre dos capas en base a la configuración de la capa superior.....	43
Tabla 23: Resultados de la herramienta de simulación LDM de dos capas del grupo TSR para un canal AWGN .....	47
Tabla 24: Resultados herramienta de simulación LDM Multilayer para un canal AWGN.....	47
Tabla 25: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL QPSK 1/4 y capa inferior LL variante .....	47
Tabla 26: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL 64-QAM 2/5 y capa inferior LL variante .....	47
Tabla 27: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL 256-QAM 2/5 y capa inferior LL variante .....	48
Tabla 28: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con capa superior robusta .....	48
Tabla 29: Umbrales SNR en dB para 2 capas QPSK más 2 capas de 256-QAM.....	49
Tabla 30: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija.....	49
Tabla 31: Umbrales SNR en dB para N capas con modulación QPSK 1/4.....	50
Tabla 32: Umbrales SNR en dB para N capas con modulación 64-QAM 2/5 .....	50
Tabla 33: Umbrales SNR en dB para múltiples capas QPSK 1/4 y la última capa con configuración 256-QAM 2/5 .....	51

## Ilustraciones

Ilustración 1: Sistema LDM de dos capas .....	6
Ilustración 2: Esquema del transmisor en LDM.....	7
Ilustración 3: Esquema del receptor LDM .....	8
Ilustración 4: Escenario del sistema LDM de dos capas .....	11
Ilustración 5: Componentes espectrales de la señal de N capa.....	11
Ilustración 6: Elementos del sistema de comunicación digital.....	15
Ilustración 7: Esquema canal AWGN .....	17
Ilustración 8: Esquema demultiplexación LDM de dos capas .....	18
Ilustración 9: Esquema del transmisor en el simulador .....	19
Ilustración 10: Multiplexor LDM.....	22
Ilustración 11: Entrelazador .....	22
Ilustración 12: Codificador OFDM .....	23
Ilustración 13: Matriz resultante tras la conversión seria a paralelo en el codificador OFDM .....	24
Ilustración 14: Esquema del receptor en el simulador.....	25
Ilustración 15: Decodificador OFDM .....	26
Ilustración 16: Desentrelazador.....	26
Ilustración 17: Demultiplexador LDM implementado en la herramienta de simulación .....	27
Ilustración 18: Cancelación de la señal en LDM.....	27
Ilustración 19: Diagrama de Gantt .....	40

## Gráficas

Gráfico 1: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 64-QAM 1/2 (LL) .....	31
Gráfico 2: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 64-QAM 2/3 (LL) .....	31
Gráfico 3: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 256-QAM 3/5 (LL) .....	32
Gráfico 4: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 256-QAM 3/4 (LL) .....	32
Gráfico 5: Escenario de simulación orientado al entorno de la TDT .....	33
Gráfico 6: Escenario de simulación orientado al entorno IoT .....	34
Gráfico 7: Umbrales SNR en dB para N capas con modulación QPSK 1/4.....	35
Gráfico 8: Umbrales SNR en dB para N capas con modulación 64-QAM 2/5 .....	35
Gráfico 9: Umbrales SNR en dB para N capas QPSK y la última capa de 256-QAM .....	36
Gráfico 10: Comparación entre configuración con capa superior UL robusta vs poco robusta.....	36
Gráfico 11: Umbrales SNR en dB para 2 capas QPSK más 2 capas de 256-QAM .....	37
Gráfico 12: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija (QPSK + 16-QAM + 256-QAM) .....	37
Gráfico 13: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija (QPSK + 64-QAM + 256-QAM) .....	38



## Acrónimos

<b>ATSC</b>	Advanced Television System Committee
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BCH</b>	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>CLI</b>	Cross Layer Interference
<b>CR</b>	Code rate
<b>dB</b>	Decibelio
<b>DVB-T</b>	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
<b>EHU</b>	Euskal Herriko Unibertsitatea
<b>FD</b>	Frequency Domain
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>GI</b>	Guard Interval
<b>HDTV</b>	High Definition Television
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IL</b>	Injection Level
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>LDM</b>	Layered Division Multiplexing
<b>LDPC</b>	Low Density Parity Check
<b>LL</b>	Lower Layer
<b>LOS</b>	Line of Sight
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>M2M</b>	Machine to Machine
<b>NLOS</b>	Non Line Of Sight
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>RF</b>	Radiofrequency
<b>SFN</b>	Single Frequency Network
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TDT</b>	Televisión Digital Terrestre
<b>TFM</b>	Trabajo Fin de Máster
<b>TSR</b>	Tratamiento de Señal y Radiocomunicaciones
<b>UE</b>	Unidad Entregable
<b>UHDTV</b>	Ultra High Definition Television
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>UL</b>	Upper Layer
<b>UPV</b>	Universidad del País Vasco
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>4G</b>	Cuarta Generación
<b>5G</b>	Quinta Generación

## 1. Introducción

En un mundo donde la tecnología avanza con gran rapidez, se puede apreciar sus consecuencias en el área de las telecomunicaciones, ámbito donde se hace uso de un recurso limitado, el espectro radioeléctrico. Se trata del medio por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio electromagnéticas que permiten las telecomunicaciones: radio, televisión, Internet, telefonía móvil, televisión digital terrestre, etc. [19] Este es un recurso escaso y, a la vez, esencial en la prestación de servicios de comunicaciones.

El espectro radioeléctrico ronda entre los 10 KHz y los 3.000 GHz. A pesar de que parezca un rango grande, cada tecnología usa unos anchos de banda considerables, y en el campo de las telecomunicaciones cada vez aumenta el número de tecnologías que lo ambicionan.

Por un lado, en el mercado de las radiocomunicaciones, ya se han podido ver los primeros tira y afloja entre los servicios de televisión y las operadoras de telefonía móvil. Un claro ejemplo, es el del dividendo digital en países como España. El dividendo digital [18], es el conjunto de frecuencias que han quedado disponibles en la banda de frecuencias tradicionalmente utilizada para la emisión de la televisión gracias a la migración de la televisión analógica a la digital. Tras la liberación, la banda de 800 MHz (UHF) dejó de utilizarse para la transmisión de la TDT y se ha asignado a los operadores de telefonía móvil para prestar nuevos servicios de banda ancha de cuarta generación (4G). Una de las razones por la que ese ancho de banda le ha sido atribuido a las operadoras de telefonía móvil, es el incremento exponencial del tráfico de datos móviles, lo que implica una mayor necesidad de frecuencias para poder prestar el servicio con la calidad adecuada. Además, la banda de 800 MHz tiene un gran potencial para el suministro de servicios en movilidad, ya que tiene mejores propiedades de propagación y penetración en el interior de edificios que las bandas con frecuencias más altas, utilizadas en la actualidad para 3G y 4G, lo que se traduce en un servicio de banda ancha más barato y de mejor calidad.

Por otro lado, está la aparición de nuevas tecnologías como el Internet of Things (IoT), entre otros. IOT [22] se podría definir como la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red (bien sea privada o Internet, la red de redes), dónde todos ellos podrían ser visibles e interaccionar. Respecto al tipo de objetos o dispositivos podrían ser cualquiera, desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos cotidianos como pueden ser el frigorífico, el calzado o la ropa. Cualquier cosa que se pueda imaginar podría ser conectada a internet e interaccionar sin necesidad de la intervención humana, el objetivo por tanto es una interacción de máquina a máquina, o lo que se conoce como una interacción M2M (machine to machine) o dispositivos M2M. Todos esos dispositivos también necesitarán hacer uso del espectro radioeléctrico.

Por tanto, se concluye que a medida que la tecnología avanza, de la misma manera, también debe hacerlo el uso eficiente del espectro radioeléctrico. Ahí es donde entra la tecnología Layered Division Multiplexing (LDM). Se trata de una novedosa técnica de acceso de multiplexación no-ortogonal (Non-Orthogonal Multiplexing Access, NOMA), basada en técnicas de asignación de potencia, que recientemente se ha incluido en el estándar ATSC 3.0 para la Televisión Digital Terrestre (TDT). Se estudiaron las capacidades de LDM para el caso de dos capas, principalmente cuando una de las capas se dirige a servicios móviles/interiores y la otra a programas de alto rendimiento. Se ha demostrado teórica y prácticamente que es más eficiente en cuanto a espectro que las técnicas de multiplexación clásica tales como, multiplexación por división de tiempo (TDM) o multiplexación por división de frecuencia (FDM) [21]. Para poder cumplir con los requisitos del sistema y de la industria, las opciones de configuración de esta primera versión de LDM han sido limitadas. En primer lugar, con el fin de garantizar un receptor de baja complejidad y la mínima latencia posible, se considera un solo sistema de dos capas, y además, ambas capas deben compartir los mismos parámetros de configuración de forma de onda física: tamaño FFT, longitud del intercalador de tiempo (TI), la longitud del intervalo de protección (GI), la densidad del piloto (PD), etc. En segundo lugar, para reducir los requisitos de memoria, ambas capas/servicios deben sincronizarse en tiempo/frecuencia.

Considerando los beneficios de LDM en el uso eficiente del espectro radioeléctrico, en este TFM se propone ampliar el estudio a múltiples capas ( $N > 2$ ), diversificando su uso a paradigmas de comunicación no analizados hasta el momento. LDM debe entenderse como una técnica general de intercambio de recursos y, en consecuencia, su alcance debe ampliarse a otras posibles aplicaciones o sistemas de comunicación.

## 2. Objetivos y alcance del trabajo

### 2.1. General

El objetivo principal de este proyecto es ampliar el estudio de LDM, cuya tecnología se ha empleado en la transmisión de la televisión digital (TDT) basándose en la multiplexación de dos capas para ofrecer servicios móviles y fijos. Se busca extender la investigación a múltiples capas, para evaluar su potencial implementando el análisis teórico en una herramienta de simulación, la cual nos permitirá obtener unos resultados más aproximados a la realidad que ratifiquen los estudios teóricos.

### 2.2. Específicos

Para lograr la meta del proyecto, es necesaria la consecución de pequeños desarrollos, que paulatinamente permitirán acercarse al propósito final.

Inicialmente, se tendrá que realizar una revisión del estado del arte de LDM, es decir, se hará un análisis de tipo documental acerca de los estudios ya existentes que rodean esta tecnología. De esta forma, se mostrará los avances más importantes que se han logrado con respecto al conocimiento de LDM. Esto permitirá adoptar una perspectiva teórica a partir de la interpretación de los documentos existentes.

En la actualidad, la tecnología LDM se ha empleado únicamente para el uso de dos capas. En el proyecto, se desarrollará una herramienta de simulación con el objetivo de extender el estudio de LDM a múltiples capas ( $N > 2$ ), la cual permita caracterizar cuantitativamente el rendimiento de un sistema N-LDM. Antes, habrá que diseñar un esquema de los distintos bloques a implementar en la herramienta de forma que posibilite realizar el desarrollo del código de forma ordenada. Posteriormente, se implementarán los bloques de N-LDM necesarios sobre el simulador. Por otro lado, para la extensión del estudio a múltiples capas, se tendrá que construir un algoritmo computacional que permita multiplexar y demultiplexar N capas. Finalmente, con la herramienta ya disponible, habrá que proponer una metodología que permita la validación de la herramienta para N-LDM.

Una vez se tenga la herramienta de simulación desarrollada y validada, se podrá comenzar con las simulaciones. Los resultados de estas, proporcionarán una evaluación del rendimiento de N-LDM. Tras el análisis, será posible obtener una idea del alcance futuro de la tecnología.

## 3. Beneficios

### 3.1. Técnicos

El principal beneficio técnico se basa en la demostración práctica de que N-LDM puede ser posible. Esto se lleva a cabo con el desarrollo de una herramienta que permite simular una nueva cadena de comunicación aplicando un nuevo modelo de transmisión, que permite ampliar el estudio del rendimiento de una técnica novedosa en el ámbito de las comunicaciones como es LDM. El programa, permitirá realizar un primer análisis del alcance de esta tecnología.

Por otro lado, en estudios anteriores, ya se ha comprobado como LDM permite un uso mucho más eficaz del reducido espectro y una mayor flexibilidad en la difusión de contenidos y servicios. Las ventajas de esta novedosa técnica han propiciado que haya sido aceptada como tecnología a utilizar en el estándar de televisión estadounidense ATSC 3.0.

Por lo tanto, el empleo de mayor número de capas, conllevaría un uso aún más eficaz del espectro. El estudio de las aplicaciones potenciales de LDM de múltiples capas podría abrir el abanico a paradigmas de comunicación no analizados hasta ahora, donde emplear la tecnología y aprovechar sus beneficios.

### 3.2. Económicos

Tal y como se mencionaba en apartados anteriores, uno de los mayores beneficios técnicos sería la mejora de la eficiencia espectral, lo cual trae consigo una reducción en la potencia de transmisión necesaria para obtener la misma calidad de transmisión que en la actualidad. Ese ahorro en el consumo eléctrico, generaría un ahorro en costes.

Por otro lado, el hecho de hacer uso de menor ancho de banda, también implica menor gasto en la compra de un ancho de banda del espectro radioeléctrico, el cual es muy caro debido a que es un bien muy preciado por las empresas de comunicaciones.

### 3.3. Sociales

Haciendo hincapié en la liberación de parte del espectro radioeléctrico, que trae consigo la mejora de la eficiencia espectral, este se podría emplear de dos formas que conllevarían un beneficio social. Ese ancho de banda, se podría aprovechar, bien para ofrecer nuevos servicios, o para aumentar la capacidad de transmisión de los servicios ya existentes en bandas contiguas, mejorando así las prestaciones de éstos.

## 4. Análisis del estado del arte

### 4.1. Layered Division Multiplexing [3][4]

#### 4.1.1. Conceptos básicos

La multiplexación por división en capas (LDM) está basada en técnicas de asignación de potencia, la cual se ha incluido recientemente en el estándar ATSC 3.0 de televisión digital terrestre (TDT). Las capacidades de LDM se han estudiado sólo para el caso de dos capas, principalmente cuando una de las capas está dirigida a servicios móviles/interiores y la otra a programas de alto rendimiento.

A diferencia con los sistemas TDM/FDM tradicionales, en los sistemas LDM, haciendo uso de la superposición del espectro, los servicios de difusión/multidifusión digital se transmiten en diferentes capas de señal dentro de un canal de RF, mientras que cada capa ocupa el espectro de frecuencia completo a tiempo completo. Por lo tanto, esta estructura proporciona inherentemente diversidad de frecuencia completa y diversidad de tiempo a las señales en todas las capas, es decir, se consigue un uso más eficiente y flexible del espectro.

En un principio, LDM se ha planteado como la transmisión de una señal estructurada en dos capas, donde las transmisiones en diferentes capas tienen diferentes características para la entrega de diferentes servicios.

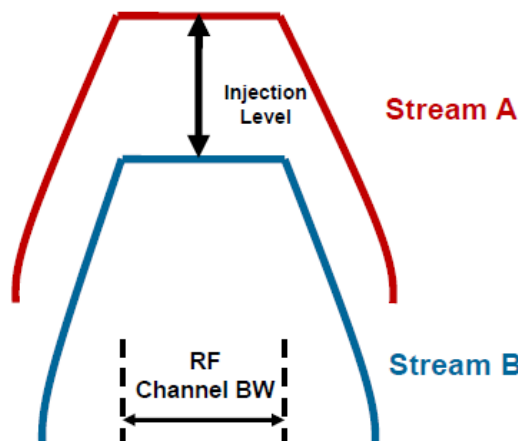


Ilustración 1: Sistema LDM de dos capas [3]

## 4.1.2. Arquitectura del sistema de comunicación

### 4.1.2.1. Transmisor LDM

A continuación, se muestra la arquitectura del transmisor. Para empezar, se identifican los dos servicios, el que se va a transmitir en la capa superior y el que se enviará en la capa inferior multiplicándolo por un cierto nivel de inyección, de manera que se puedan separar en diferentes capas.

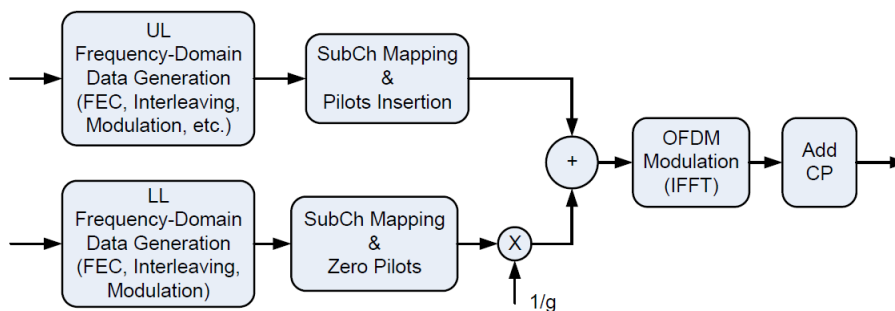


Ilustración 2: Esquema del transmisor en LDM [4]

Como se muestra en el esquema, para un sistema LDM de dos capas, primero se procesan los datos de cada servicio de forma independiente por sus propios módulos de procesamiento de señal de capa física, que incluyen FEC, entrelazado, modulación, etc. Después, mediante la multiplexación por potencia, se unen las dos señales en una sola.

La señal LDM de dominio de frecuencia (Frequency Domain, FD) se genera como la superposición de las señales de las dos capas como:

**Ecuación 1:**

$$X(k) = X_{UL}(k) + g \cdot X_{LL}(k)$$

donde  $X_{UL}(k)$  y  $X_{LL}(k)$  son símbolos FD de UL y LL,  $X(k)$  es el símbolo LDM combinado,  $g$  es el nivel de potencia de la señal LL en relación con la señal UL y  $k$  es el índice del subcanal.

El nivel de inyección,  $g$ , define la asignación de potencia entre las dos capas. Dado que la señal UL está diseñada para tener mayor potencia,  $g$  tiene un valor real entre  $[0, 1)$ , donde  $g = 0$  da como resultado un sistema de una sola capa.

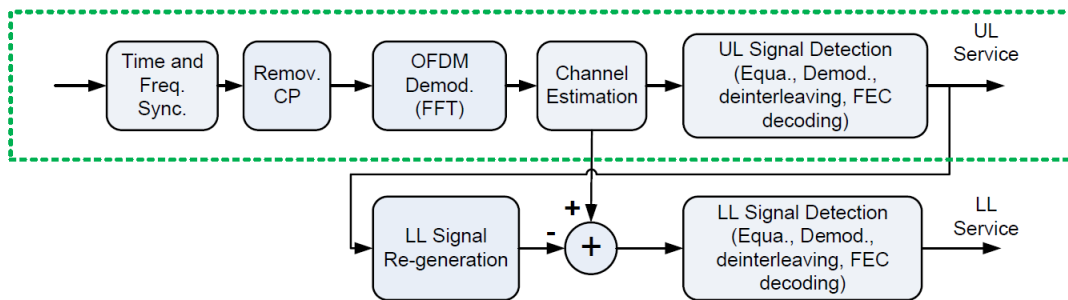
Finalmente, tras el paso por el Multiplexador LDM, esa señal conjunta pasará por el codificador OFDM antes de ser transmitida. En el planteamiento para el sistema ATSC 3.0, las señales de transmisión en diferentes capas utilizan formas de onda de capa física basadas en OFDM, y todas las capas comparten la misma estructura de señal OFDM. Estos incluyen el tamaño OFDM FFT, la



duración del prefijo cíclico (CP), así como la estructura piloto. Si bien el uso de la misma estructura OFDM no es obligatorio para ningún sistema LDM, puede simplificar enormemente la detección de señal en los receptores LDM y, por lo tanto, permite una implementación de receptor de baja complejidad y eficiencia energética.

#### 4.1.2.2. Receptor LDM

En cuanto a la recepción, cabe mencionar que en LDM se utilizan técnicas de cancelación para recuperar la señal de la capa inferior. A grandes rasgos, esta técnica consiste en recuperar la señal robusta de la capa superior primero, cancelarla de la señal recibida, y así poder comenzar con la decodificación de la señal de la capa inferior. A continuación se muestra el diagrama de bloques de un receptor LDM:



*Ilustración 3: Esquema del receptor LDM [4]*

La señal LDM recibida se puede expresar como:

**Ecuación 2:**

$$Y(k) = X_{UL}(k) \cdot H(k) + g \cdot X_{LL}(k) \cdot H(k) + N(k)$$

donde  $Y(k)$  es el símbolo recibido en el  $k$ -ésimo subcanal y  $N(k)$  contiene ruido AWGN y otras interferencias aditivas. Para decodificar la señal UL, el servicio LL de menor potencia se trata como una interferencia adicional. El impacto de esta interferencia es controlable mediante el uso de diferentes niveles de inyección.

Por ejemplo, un nivel de inyección de 5 dB establece la señal LL 5 dB más baja que la señal UL. El nivel de inyección de un sistema LDM generalmente se selecciona para cumplir con los requisitos de servicio de las dos capas. Para decodificar la señal LL, el receptor primero debe cancelar la señal UL. A partir de la ecuación 2, los símbolos de decisión de la señal LL se pueden obtener como:

**Ecuación 3:**

$$\hat{Y}_{LL}(k) = \frac{1}{g} (Y(k) - \hat{X}_{UL}(k) \cdot \hat{H}(k))$$

donde  $\hat{X}_{UL}(k)$  es la estimación del símbolo de transmisión UL en el subcanal  $k$ , y  $\hat{H}(k)$  es la estimación del canal.

Para realizar la cancelación de señal en la ecuación 3, el receptor necesita obtener las estimaciones de los símbolos de transmisión UL,  $\hat{X}_{UL}(k)$ . Esto se logra realizando una detección de la señal UL que incluye ecualización, demodulación, desentrelazado y decodificación de canal, generando una secuencia de bits de decisión precisa. El receptor luego realiza la codificación, entrelazado y modulación de canal para reconstruir los símbolos de transmisión UL. Aunque este proceso de cancelación implica complejidad para realizar la decodificación de canales UL, puede proporcionar las estimaciones de símbolos UL más confiables.

El LL está típicamente diseñado para entregar servicios de alta velocidad de datos a receptores fijos a altas SNR, lo que debería garantizar fácilmente la detección perfecta de la señal UL, es decir,  $\hat{X}_{UL}(k) = X_{UL}(k)$ . Además, se demostrará que, a las altas SNR requeridas para la detección del servicio LL, la complejidad adicional requerida por la decodificación del canal para la señal UL es muy baja [17].

Se puede realizar una cancelación de señal más simple al tomar decisiones difíciles sobre los símbolos de transmisión UL sin involucrar el proceso de decodificación del canal. Esto, sin embargo, inevitablemente introducirá interferencia de capa cruzada (Cross Layer Interference, CLI) ya que el rendimiento de error de la señal UL sin decodificación de canal no será perfecto incluso con SNR muy altas.

Una de las desventajas a destacar de este sistema, es que con un sistema multicapa para recuperar con éxito la señal de la capa inferior, primeramente debe ser recuperada la señal de la capa superior y después ser cancelada de la señal recibida. Esto hace que las técnicas de cancelación de la señal sea una parte importante para la operación del sistema, ya que una mejor capacidad para recuperar señales de la capa inferior, supone un mejor rendimiento del sistema.

#### 4.1.3. Configuraciones del sistema

En general, la señal UL está diseñada para brindar servicios robustos a receptores móviles, portátiles y de interior. Brindar servicios confiables de transmisión móvil ha resultado ser muy desafiante en el pasado. En primer lugar, la ganancia de antena y la directividad son limitadas para la mayoría de los receptores portátiles. En segundo lugar, los dispositivos móviles pueden

moveirse con frecuencia hacia áreas sombreadas o interiores. Ambos dan como resultado una potencia de señal recibida muy baja.

En segundo lugar, los receptores móviles que se mueven rápidamente experimentan canales que cambian rápidamente en el tiempo. Diseñar receptores para una detección confiable en canales de desvanecimiento rápido siempre ha sido una tarea difícil, especialmente para los sistemas basados en OFDM. Para ofrecer servicios móviles robustos con áreas de cobertura decentes, la señal UL en un sistema LDM está diseñada para tener una mayor potencia de transmisión y utilizar una codificación y modulación de canal muy fuerte, es decir, código de tasa de 1/4 para el codificador LDPC y modulación QPSK.

Esta señal está optimizada para la robustez en entornos hostiles de canales inalámbricos y puede proporcionar una buena detección a una SNR muy baja (inferior a 0 dB) y, por lo tanto, proporciona una gran área de cobertura y menos "agujeros" de servicio causados por la distorsión por trayectos múltiples y el sombreado. Se puede demostrar además que diseñar un receptor robusto para la señal UL en canales de desvanecimiento rápido ya no es un desafío significativo [16].

El LL generalmente está diseñado para entregar Ultra-HDTV (UHDTV) o múltiples servicios completos de HDTV, que generalmente requieren SNR mucho más altos para una recepción exitosa. Estos servicios están destinados a receptores fijos, que tienen antenas grandes en ubicaciones altas (por ejemplo, en la azotea) y, a veces, antenas direccionales que son capaces de proporcionar una ganancia de antena significativamente mayor en comparación con los dispositivos móviles.

Por lo tanto, el LL generalmente está diseñado para tener una potencia de transmisión más baja, una codificación de canal más débil y una constelación de señal más grande (es decir, 256QAM o más).

Tal y como se ha hecho mención, esta tecnología presenta distintas coberturas dependiendo del servicio que se implementa en cada capa y de la distancia a la que se encuentre el receptor respecto del transmisor. Por lo tanto, dependiendo de la distancia será posible recibir los dos servicios de sendas capas, sólo el de la capa superior o no recibir ninguno de los dos servicios. Esto se puede apreciar mejor en la siguiente imagen:



Ilustración 4: Escenario del sistema LDM de dos capas [3]

## 4.2. Asynchronous N-Layered Division Multiplexing (N-LDM) [5]

En esta sección se presenta el cálculo teórico para la capacidad de LDM de una forma genérica para N capas.

La señal de N capas de dominio de frecuencia se puede representar como la superposición de N señales diferentes:

**Ecuación 4:**

$$x_{TX}(k) = x_1(k) + g_1 \cdot x_2(k) + \dots + g_{N-1} x_N(k)$$

Los diferentes valores de  $g_i$  son las expresiones lineales de los niveles de inyección ( $\Delta_i = 20 \log_{10} g_i$ ), y por consiguiente, pueden entenderse como las expresiones numéricas de la profundidad de las capas enterradas en comparación con la capa superior.

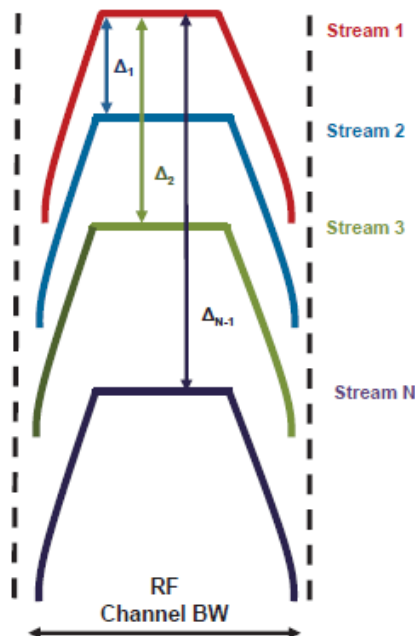


Ilustración 5: Componentes espectrales de la señal de N capa [5]

En la figura, se muestra la representación espectral del caso genérico de  $N$  capas. En el sitio del transmisor, cada capa/servicio está enterrado a un nivel de inyección ( $\Delta_i$ ), que indica el recurso de potencia,  $\sigma_i$ , asignado a cada capa. Con el fin de presentar una formulación de propósito general, debe tenerse en cuenta que para la primera capa el nivel de inyección asignado debe considerarse nulo ( $\Delta_0 = 0$  dB). Posteriormente, si se desea, toda la señal superpuesta puede normalizarse por potencia. En consecuencia, para este caso genérico, la señal transmitida,  $X_{TX}$ , es la suma ponderada de todos los servicios componentes. Además, cada capa está ponderada por un factor  $\sigma_i$ , que puede describirse como una serie de valores lineales que disminuyen monótonamente ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_N$ ).

Para obtener la señal transmitida, cada componente es ponderado por un factor de potencia:

**Ecuación 5:**

$$x_{TX} = \sqrt{\sigma_1}x_1 + \sqrt{\sigma_2}x_2 + \dots + \sqrt{\sigma_N}x_N$$

Además, también se supone que la información transportada en cada capa ha sido normalizada. Los datos de cada capa y el factor de potencia global se normalizan.

**Ecuación 6:**

$$E\{\|x_1\|\} = E\{\|x_2\|\} = \dots = E\{\|x_N\|\} = 1$$

Eventualmente, la potencia total de la señal también se ha normalizado para calcular la eficiencia del espectro.

**Ecuación 7:**

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_N = 1$$

En este punto, es importante tener en cuenta que cada nivel de potencia de la capa está controlado por el nivel de inyección, que determina la diferencia de potencia entre las diferentes capas. Como se mencionaba anteriormente, se supone que todos los niveles de potencia se hacen en referencia a la primera capa.

Resolviendo la ecuación 5 y la ecuación 7 se puede demostrar que la potencia asignada a cada capa puede definirse de forma genérica como:

**Ecuación 8:**

$$\sigma_i = \frac{10^{\left(\frac{\Delta_{i-1}}{10}\right)}}{\sum_{i=1}^N 10^{\left(\frac{\Delta_{i-1}}{10}\right)}} \quad i = 1 \dots N$$

Debe recordarse que para el servicio superior, el nivel de inyección asignado debe ser  $g_0$  o  $\Delta_0 = 0$  dB. Respecto a la interferencia, para cada capa  $i$ , todas las capas enterradas (de  $i + 1$  a  $N$ ) se consideran ruido gaussiano. Además, para cada cálculo de capacidad de capa, el impacto de las capas anteriores no debe tenerse en cuenta, ya que se asume una cancelación perfecta, y por lo tanto, no hay acumulación de errores. Sobre la base de eso y de los estudios presentados anteriormente, cada capacidad de capa en el escenario multicapa puede definirse como:

**Ecuación 9:**

$$C_i = \begin{cases} \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_i}{N_0 + \sum_{k=i+1}^N \sigma_k} \right) & i = 1 \dots N - 1 \\ \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_i}{N_0} \right) & i = N \end{cases}$$

donde  $N_0$  es la potencia AWGN y  $C_i$  la capacidad de transmisión de cada servicio. Finalmente, hay que señalar que  $C = \sum C_i$ .

## 5. Metodología

Este apartado contiene la metodología utilizada para alcanzar los objetivos descritos en apartados previos. Primero, se muestra la arquitectura diseñada que se implementará en la herramienta de simulación, indicando el motivo de cada uno de los bloques. A continuación, se da una descripción más detallada de cada elemento, indicando las opciones de configuración que se han implementado en la herramienta. Luego, se exponen los criterios por los que se ha optado tanto para evaluar el rendimiento de LDM, como para validar la herramienta. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones y se ofrece una explicación de la conclusión a la que se ha llegado.

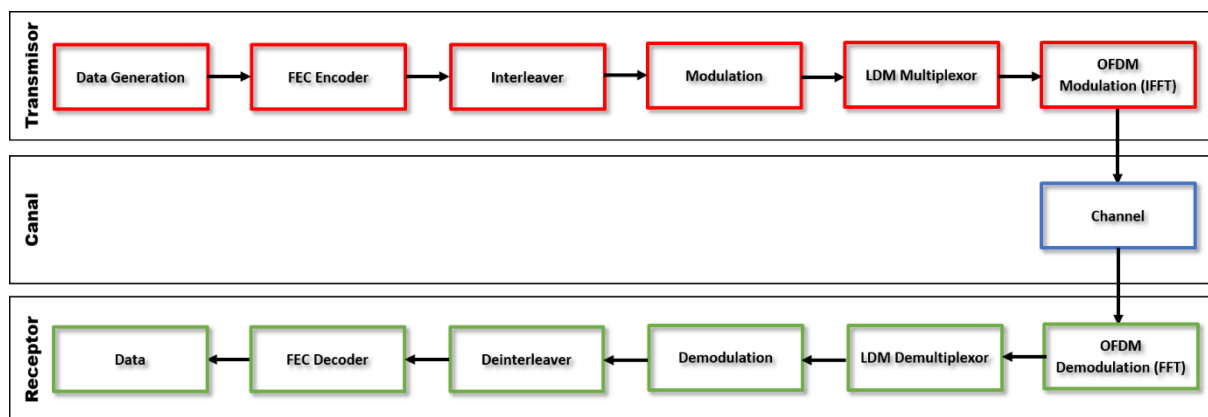
### 5.1. Definición de la arquitectura para el sistema de comunicación

El objetivo de predefinir un esquema, será facilitar la implementación en la herramienta que va a simular la transmisión de una secuencia de comunicación.

A grandes rasgos, se persigue simular un sistema genérico de comunicaciones digital y, configurando diferentes variables del sistema, analizar su rendimiento mediante los resultados que se obtengan siguiendo el criterio de evaluación que se explicará en apartados posteriores. Para ello, se genera un bloque de datos que compondrá la señal y esta será transmitida; sobre esa señal tendrá influencia la distorsión del canal; y, por último, se reconstruirá la señal en un receptor.

Por ende, tal y como se puede apreciar en la ilustración 6, se ha dividido el diseño de la arquitectura en tres partes esenciales que componen el sistema, las cuales son: Transmisor, Canal de comunicación y Receptor, por medio de los cuales los datos transmitidos siguen el camino que genera el sistema de comunicación.

Cada una de esas tres partes mencionadas, lo compondrán otros elementos, los cuales se explicaran en los siguientes apartados haciendo mención del porqué del uso de cada uno de ellos. Tomando como referencia del apartado del estado del arte, los diagramas de bloques del transmisor y el receptor mostrados en el subapartado de la arquitectura de LDM de dos capas, se han definido los siguientes módulos:



*Ilustración 6: Elementos del sistema de comunicación digital*

Debido a que en varios de los elementos, el funcionamiento en el receptor es el mismo que en el transmisor pero al inverso, la descripción de ambos se harán en conjunto en el apartado del transmisor. Aunque en el esquema, puede apreciarse en que parte del sistema de comunicación ira integrado cada uno.

### 5.1.1. Sistema transmisor

El transmisor es el primer elemento del Sistema de Comunicación; en él son generados los datos en la fuente digital para conformar la señal que posteriormente será transmitida al canal.

#### 5.1.1.1. Fuente de información

Es el punto de origen del sistema de comunicaciones y el encargado de enviar la información deseada en forma de señal. Esta será una señal digital, generada a partir de una secuencia pseudoaleatoria. Se plantea un escenario en el que se ofrecerán  $N$  servicios, donde  $N$  es el número de capas generadas, para después aplicar la multiplexación por potencia.

Para ello, el sistema podrá tener varios puntos ( $N$ ) de entrada de datos, y cada cual ira codificado y finalmente multiplexado en su correspondiente capa aplicando la técnica de LDM. Al tener varios puntos de entrada o generación de datos, se da la opción a ofrecer varios servicios simultáneamente. Estos podrán ser de diferente índole.

#### 5.1.1.2. Codificador/Decodificador LDPC

Para una comunicación más eficaz, es ampliamente sabido que la inclusión de bits de paridad en la transmisión de información proporciona capacidades detectoras y correctoras al código transmitido.

Por ende, se añade un codificador LDPC, para la corrección de errores al transmitir un mensaje por un canal de comunicaciones



ruidoso, permitiendo recuperar paquetes perdidos en la distribución de datos masivos.

El decodificador LDPC, se encargará de la corrección de errores que se han generado al transmitir un mensaje por un canal de comunicaciones ruidoso, permitiendo recuperar paquetes perdidos en la distribución de datos masivos.

#### *5.1.1.3. Entrelazado/Desentrelazado*

El objetivo del entrelazado, es organizar la información digital de forma no contigua para mejorar las prestaciones del sistema. Está técnica ayudará a proteger la información frente a los errores de ráfaga.

El desentrelazado será el encargado de realizar el trabajo inverso al entrelazado, reorganizando la información al estado original enviada por el transmisor.

#### *5.1.1.4. Modulación/Demodulación*

Mediante las técnicas de modulación, se aprovechará de una forma más eficiente el canal de comunicación y posibilitará aumentar la cantidad de información transmitida de forma simultánea además de fortalecer la señal contra posibles ruidos e interferencias. Tomando como referencia el estándar de DVB-T2, se consideran dos tipos de modulación:

- Modulación por desplazamiento de fase (PSK, Phase Shift Keying)
- Modulación de amplitud en cuadratura (QAM, Quadrature Amplitude Modulation)

#### *5.1.1.5. Multiplexador LDM*

La multiplexación por división en capas (LDM) dará la posibilidad de transmitir de manera más eficiente múltiples servicios con diferente robustez y rendimiento en un canal. Además de la flexibilidad que ofrece el sistema, proporciona mejoras significativas en la eficiencia del espectro.

#### *5.1.1.6. Modulador/Demodulador OFDM*

La multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM), es un método de modulación digital ampliamente utilizado en las comunicaciones inalámbricas, como WLAN, LTE, DVB-T2 y 5G. La principal ventaja de OFDM es su capacidad para hacer frente a condiciones severas del canal sin filtros complejos de ecualización, como por ejemplo: la atenuación de altas frecuencias, la interferencia de banda estrecha y el desvanecimiento selectivo de la frecuencia debido a múltiples trayectorias. Este mecanismo también facilita el diseño de redes de frecuencia única (SFN) en los que varios transmisores adyacentes envían la misma señal simultáneamente

a la misma frecuencia, ya que las señales de los transmisores múltiples se pueden combinar de forma constructiva, evitando la interferencia.

### 5.1.2. Propagación

El canal de comunicación, es el medio físico usado para enviar la señal desde el transmisor al receptor.

Para el canal de propagación, se ha considerado el canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) [8]. Se trata de un canal ideal en el cual se asume una fuente de ruido blanco que tiene una densidad espectral de potencia constante sobre todo el ancho de banda del canal y una amplitud de distribución gaussiana.

Aunque menos realista que otros canales de simulación como LOS o NLOS, un canal gaussiano también es importante ya que proporciona una percepción de cuál sería el mejor rendimiento del sistema sin la presencia de multitrayectoria.

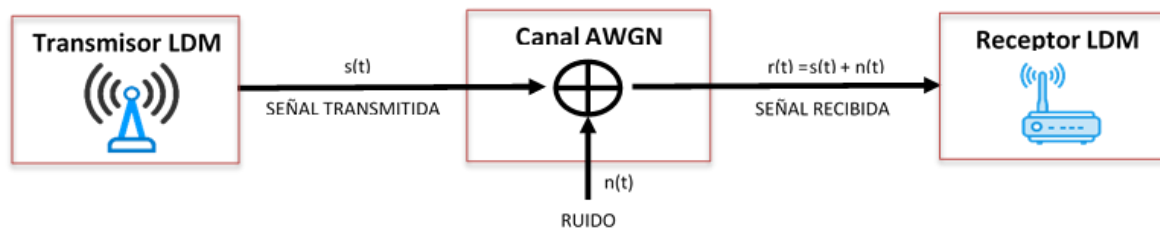


Ilustración 7: Esquema canal AWGN

Por esa razón, se ha escogido el canal AWGN como canal de propagación para la simulación, ya que este es suficiente para lograr el objetivo del proyecto.

La potencia del ruido, será uno de los parámetros que va a ser controlado para analizar el rendimiento. Esa variación, hará que la señal se vea afectada tras su paso por el canal ruidoso y por tanto la calidad de la señal varié. Esto a su vez, se traducirá en ciertos errores al decidir que bit fue transmitido (0 o 1).

### 5.1.3. Sistema receptor

El último elemento de la cadena, será el receptor. Es el punto de llegada de la transmisión y la instancia descodificadora, en el cual se realizará la operación inversa previamente hecha por el transmisor, tratando de reconstruir el mensaje de la señal.

Tal y como se mencionaba anteriormente, en este apartado del receptor sólo se describirán los bloques que no impliquen una función inversa a su correspondiente elemento del transmisor.

### 5.1.3.1. Demultiplexador LDM

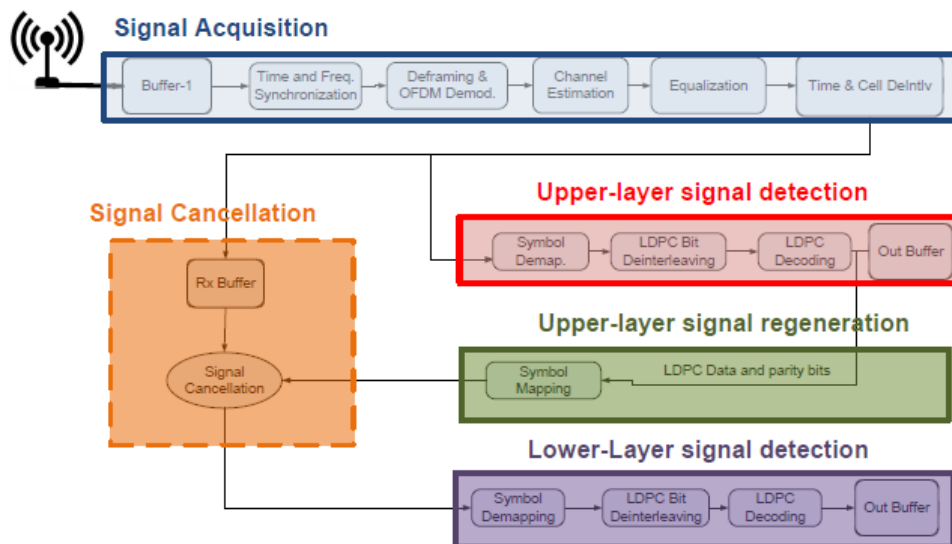


Ilustración 8: Esquema demultiplexación LDM de dos capas [3]

El demultiplexador LDM consistirá en tres fases:

- **Detección de la señal:** la señal recibida se desmodulara y se decodificara, como si de una única capa se tratara, hasta obtener los datos transmitidos por la fuente para la capa a detectar. En el caso de la capa superior, la señal de entrada en el detector será la señal completa recibida por el transmisor. Sin embargo, en el caso de las capas inferiores, la señal de entrada al detector será la señal resultante tras pasar por el módulo de cancelación.
- **Regeneración de la señal:** Una vez detectados los datos, se regeneran pasando por el mismo proceso que en el transmisor hasta antes de llegar al multiplexor LDM.
- **Cancelación:** para acceder a la información de las capas de abajo, será necesario restar a la señal que ha llegado al receptor, la señal regenerada de cada capa superior a la que se desea detectar multiplicadas por su correspondiente nivel de inyección.

### 5.1.3.2. Receptor de datos

Es el punto final del sistema, donde se recibe y analiza la información recibida.

## 5.2. Desarrollo de la herramienta de simulación

Mediante la herramienta de modelización se creará una representación virtual de un sistema real que incluye software y hardware. Esta permitirá simular esa representación virtual con una amplia gama de condiciones para ver cómo se comporta. La modelización y la simulación son especialmente útiles para probar condiciones que podrían resultar difíciles de reproducir solamente con prototipos de hardware, especialmente en la primera fase del proceso de diseño, cuando es posible que no esté disponible el hardware. Además, la iteración entre la modelización y la simulación puede mejorar la calidad del diseño del sistema en una etapa temprana y reducir así el número de errores descubiertos más adelante en el proceso de diseño.

MATLAB es una de las herramientas de simulación más empleadas hoy en día en el ámbito de la Ingeniería y Comunicaciones entre otros. Su uso permite emular con alto grado de realismo el comportamiento de las señales. Dado el potencial de MATLAB, se ha procedido a llevar a cabo el desarrollo en esta herramienta, implementando distintas funciones para incorporar los bloques planificados en la parte de la arquitectura con el objetivo de analizar el alcance de N-LDM.

A grosso modo, cada simulación consiste en transmitir  $N$  bloques de datos independientes, los cuales serán codificados y multiplexados empleando la técnica de LDM. Éstos serán transmitidos desde el transmisor hasta el receptor atravesando un canal AWGN, donde se calculará la BER de los datos recibidos para un rango de valores SNR.

### 5.2.1. Sistema de transmisión de la señal

A continuación se muestra el esquema de los módulos implementados en la herramienta para la parte correspondiente al transmisor.

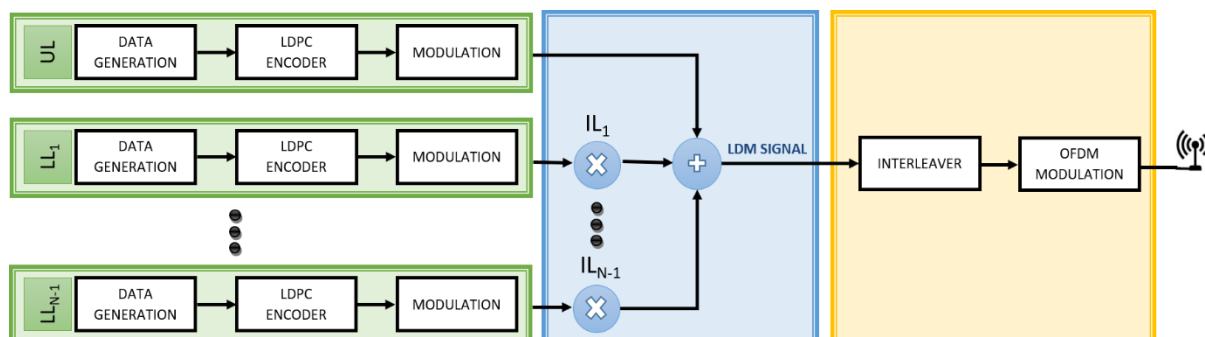


Ilustración 9: Esquema del transmisor en el simulador

Como se puede apreciar, al contrario de lo mencionado en el apartado de la arquitectura, el entrelazado no está junto con el codificador LDPC. Se ha situado después de la multiplexación, ya que de esta forma sólo se pasara una única vez por la función del entrelazado. El objetivo será reducir los tiempos de simulación ya que la herramienta requiere un gran procesamiento.

#### 5.2.1.1. Fuente de información

Se generan N secuencias pseudoaleatorias de bits, donde N es igual al número de capas, de una longitud que viene determinada por el bloque LDPC, es decir, tendrá un tamaño de 64800 bits. A su vez, se generan varias tramas de datos, cuyo número variará con base en la modulación utilizada para la capa.

En cada capa, la cantidad de tramas será igual al número de símbolos utilizados para modular los datos. La razón de que el número de tramas varíe para cada capa, es que se necesitara el mismo número de registros en la entrada del multiplexador LDM, o lo que es lo mismo, en la salida del modulador, para poder sumar las distintas capas aplicándole a cada una su nivel de inyección correspondiente.

#### 5.2.1.2. Codificador LDPC

En MATLAB existe el objeto "*comm.LDPCEncoder*", el cual, codifica un código binario de comprobación de paridad de baja densidad [9]. A este objeto, se le debe especificar como parámetro de entrada una matriz de comprobación de paridad.

Para generar una matriz con las especificaciones establecidas por el objeto mencionado anteriormente, se hará uso de la función *dvbs2ldpc* [10] predefinida en MATLAB, la cual devuelve la matriz de comprobación de paridad del código LDPC con tasa de código CR (Code Rate) del estándar DVB-S2.

La función permite aplicar los siguientes valores para el CR:

Tabla 1: Code rate

CR	1/4	1/3	2/5	1/2	3/5	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10
----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

El CR es importante ya que será uno de los parámetros configurables en las simulaciones.

La longitud de entrada de datos al objeto será, la longitud de salida del codificador LDPC (64800 bits) multiplicado por el CR.

### 5.2.1.3. Modulador

Para modular los datos, se ha optado por configuraciones que permitan simular en la herramienta tanto entornos en los que se necesita de una modulación robusta como para entornos en los que interesa mandar el máximo de información útil posible. Entre las opciones escogidas se encuentran las siguientes modulaciones:

Tabla 2: Modulación

Modulación	QPSK	8PSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
------------	------	------	--------	--------	---------

Se puede distinguir entre dos tipos de modulaciones:

- Modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying, PSK)
- Modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)

Para la modulación por desplazamiento en fase, se ha utilizado el objeto `"comm.PSKModulator"` [11]. Este objeto, modula la señal de entrada utilizando el método de codificación de cambio de fase M-aria (M-PSK). Siguiendo la tabla de modulaciones, habrá que crear dos objetos con este tipo de modulación (QPSK y 8PSK).

Para el otro caso, la modulación de amplitud en cuadratura, se ha hecho uso del objeto `"comm.RectangularQAMModulator"` [12]. Se creará uno por cada modulación (16-QAM, 64-QAM y 256-QAM).

A la hora de crear estos objetos, se le pasaran algunos parámetros de entrada, entre los que se indicará el número de símbolos, que el tipo de entrada al modulador sean bits y los de salida tipo *double*.

### 5.2.1.4. Multiplexador LDM

A la salida del bloque modulador, se tendrán N señales, cada una con su codificación y modulación personalizada. La función del multiplexador LDM, será ir sumando a la capa superior/principal (denominada UL Layer) el resto de capas pero multiplicándolas por un factor IL (nivel de inyección). A cada una de ellas se le aplicará un factor diferente, quedando las capas multiplexadas por potencia. De esta forma, a la salida del multiplexador, habrá una única señal.

En el siguiente esquema se puede ver la ecuación 4, fórmula matemática de la multiplexación LDM multicapa, representada en una imagen:

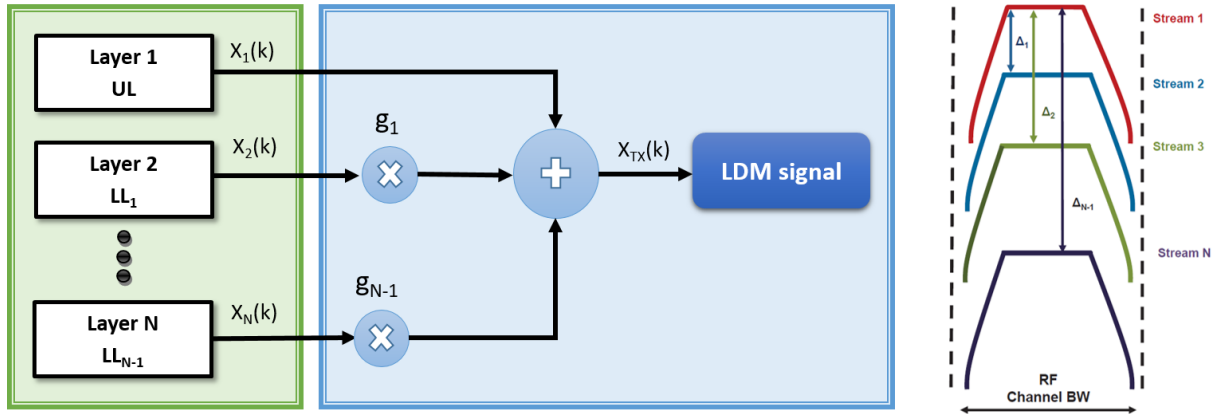


Ilustración 10: Multiplexor LDM

### 5.2.1.5. Entrelazado

En el entrelazador la señal de entrada será un vector de datos, el cual se convertirá en una matriz de  $F \times C$ , donde  $F$  será la separación que habrá a la salida entre dos bits continuos y  $C$  la longitud del vector dividido por  $F$ . A la salida del entrelazador, se devolverá un vector de la misma longitud que a la entrada.

Vector de entrada al entrelazador:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	-----

Matriz del entrelazador:

1	17	33	49	65	81	113	129	145	161	...
2	18	...								...
3	19	...								...
4	20	...								...
5	21	...								...
6	22	...								...
7	23	...								...
8	24	...								...
9	25	...								...
10	26	...								...
11	27	...								...
12	28	...								...
13	29	...								...
14	30	...								...
15	31	...								...
16	32	...								...

Vector de salida del entrelazador:

1	17	33	49	65	81	113	129	145	161	177	193	209	225	241	257	...
---	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Ilustración 11: Entrelazador

### 5.2.1.6. Codificador OFDM

Para la configuración del módulo OFDM, se ha tomado como referencia la estructura presentada en el estándar de DVB-T2. De tal manera que, se ha optado por la configuración de los parámetros para el modo 4K en un canal de 6 MHz.

Tabla 3: Parámetros OFDM para el modo 4K en un canal de 6 MHz [6]

Parámetro	Modo 4K
Numero de portadoras K	3409
Valor de la subportadora $K_{\min}$	0
Valor de la subportadora $K_{\max}$	3408
Periodo elemental T	7/48
Duración $T_u$	597,333 $\mu$ s
Espacio entre portadoras $1/T_u$	1674,107 Hz
Espacio entre $K_{\min}$ y $K_{\max}$ $(K-1)/T_u$	5,71 MHz

Tabla 4: Parámetros en el dominio del tiempo para el modo 4K en un canal de 6MHz [6]

Parámetro	Modo 4K
Parte útil del símbolo $T_u$	4096 T 597,333 $\mu$ s
Intervalo de guarda $\Delta/T_u$	1/8
Duración del intervalo de guarda $T_g$	512 T 74,67 $\mu$ s
Duración total del símbolo $T_s = \Delta + T_u$	4608 T 672,00 $\mu$ s

donde:

- K número de portadora
- $T_u$  tiempo útil de símbolo
- $\Delta$  duración del intervalo de guarda

Una vez determinada la configuración que se va a utilizar, se ha llevado a cabo la implementación del siguiente esquema OFDM en la herramienta de simulación de Matlab.

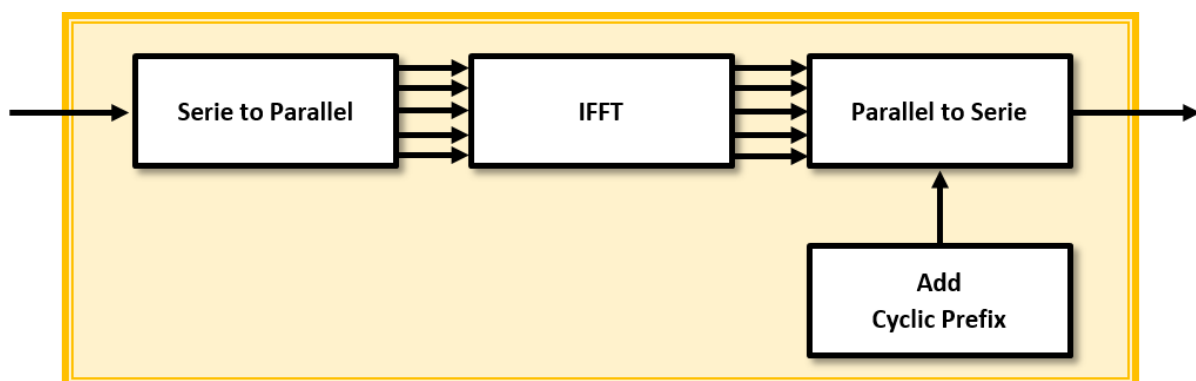


Ilustración 12: Codificador OFDM

El primer paso, será coger el vector de datos que sale del módulo del entrelazador e ir generando unas matrices, o lo que es lo mismo, realizar una conversión serie a paralelo. Las matrices tendrán un tamaño de  $M \times N$  donde  $N$  será el tamaño de NFFT, es decir, 4K (4096). Inicialmente las celdas contendrán ceros. Después, el procedimiento



consistirá en ir añadiendo los datos del vector en las celdas que hacen referencia a las portadoras activas.

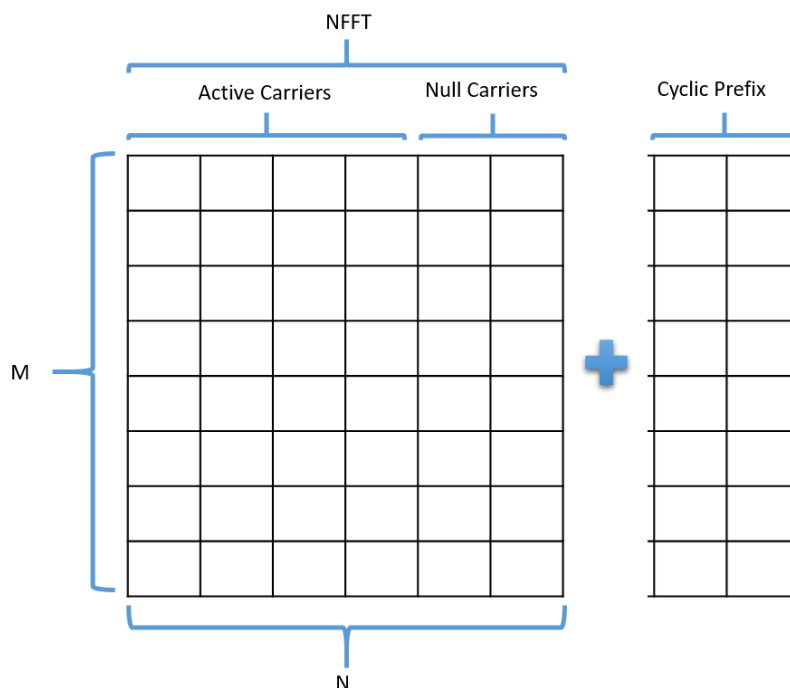


Ilustración 13: Matriz resultante tras la conversión seria a paralelo en el codificador OFDM

Luego, con los datos en paralelo, se realiza la transformada inversa de Fourier (IFFT). Finalmente, se amplía el número de columnas de la matriz y se rellena con ceros. El número de columnas que se añadirán corresponderán al prefijo cíclico. Esa matriz, se convertirá en un vector, realizando el último paso de la cadena, la conversión paralelo a serie.

#### 5.2.1.7. Salida transmisor

En la salida del transmisor, se tendrá un vector de datos. En él, gracias a la superposición del espectro, irán los datos de todos los servicios a ofrecer y se transmitirán en un único canal RF. La señal resultante se normaliza antes de enviar al canal.

### 5.2.2. Canal de propagación

Con la función *randn* de Matlab, se generan números aleatorios con una distribución normal. Es decir, se genera una señal que tendrá por media el valor cero y una desviación típica igual a uno.

Ese ruido generado, se multiplicará por la varianza que cambiará en base a la SNR introducida en la configuración de los parámetros de entrada de la herramienta de simulación, obteniendo así el ruido gaussiano deseado.

Finalmente, se le sumara este ruido gaussiano a la señal.

### 5.2.3. Sistema de recepción de la señal

Tomando como referencia la ecuación 2 y extendiéndola a N capas, la señal LDM recibida se puede expresar como:

**Ecuación 10:**

$$\begin{aligned}
 Y(k) &= X_{UL}(k) \cdot H(k) + g_1 \cdot X_{LL_1}(k) \cdot H(k) + g_2 \cdot X_{LL_2}(k) \cdot H(k) + \dots + g_{N-1} \cdot X_{LL_{N-1}}(k) \cdot H(k) + N(k) \\
 &= \left[ X_{UL}(k) + \sum_{j=1}^{N-1} g_j \cdot X_{LL_j}(k) \right] \cdot H(k) + N(k)
 \end{aligned}$$

donde  $Y(k)$  es el símbolo recibido en el  $k$ -ésimo subcanal, el subíndice N el número de capas y  $N(k)$  contiene ruido AWGN y otras interferencias aditivas.

En la siguiente ilustración, se puede apreciar el esquema implementado en la herramienta para obtener la señal de cada capa.

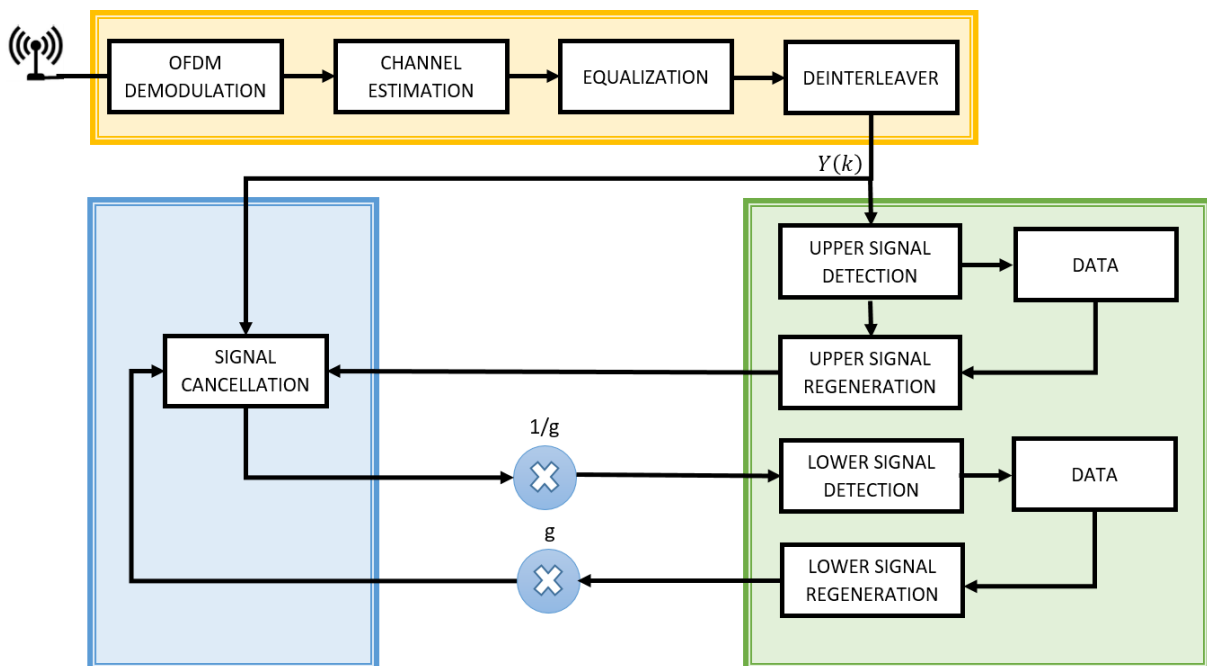


Ilustración 14: Esquema del receptor en el simulador

#### 5.2.3.1. Demodulador OFDM

Una vez la señal llega al receptor, el primer paso será llevar a cabo la demodulación OFDM, la estimación del canal y la ecualización. En el diagrama de bloques mostrado a continuación, se puede ver el bloque de demodulación OFDM descompuesto.

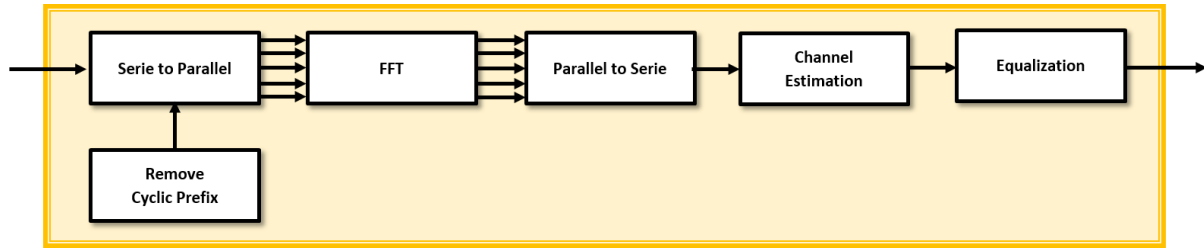


Ilustración 15: Decodificador OFDM

Tal y como se puede apreciar, se sigue el procedimiento inverso al del codificador OFDM. No obstante, en este caso deberá hacerse una estimación del canal y ecualizar la señal.

### 5.2.3.2. Desentrelazado

El desentrelazador realizará el proceso inverso al entrelazado, reorganizando la información al orden original.

Vector de entrada al desentrelazador:

1	17	33	49	65	81	113	129	145	161	177	193	209	225	241	257	...
---	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Matriz del entrelazador:

1	17	33	49	65	81	97	113	129	145	161	...
2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Vector de salida del desentrelazador:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	-----

Ilustración 16: Desentrelazador

### 5.2.3.3. Demultiplexador LDM

En el siguiente esquema, se muestran los bloques de la demultiplexación LDM con más detalle respecto al diagrama de bloques general expuesto para el receptor:

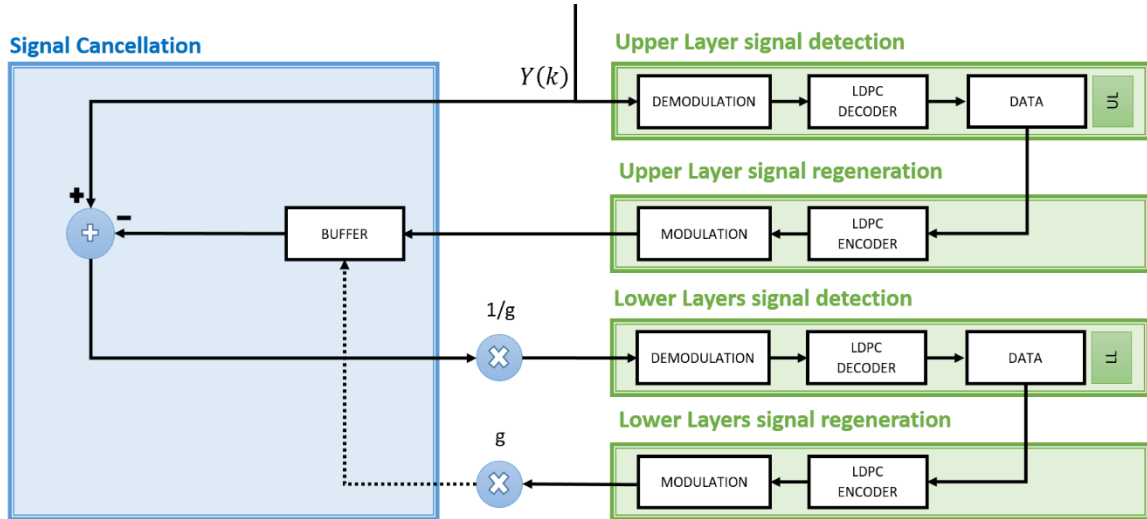


Ilustración 17: Demultiplexador LDM implementado en la herramienta de simulación

Para decodificar la señal UL, los servicios LL de menor potencia se tratan como una interferencia adicional.

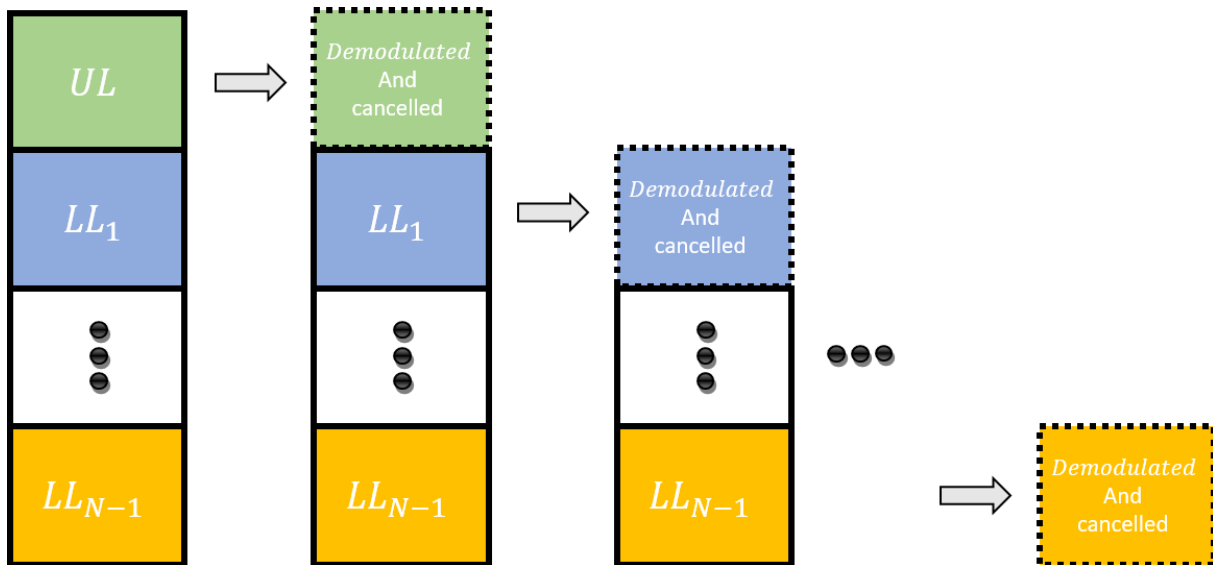


Ilustración 18: Cancelación de la señal en LDM

Para decodificar las señales LL, el receptor primero debe cancelar la señal de las capas superiores. A partir de la ecuación 3, extendiendo la fórmula a N capas, los símbolos de decisión de la señal LL se pueden obtener como:

**Ecuación 11:**

$$\hat{Y}_j(k) = \frac{1}{g_j} \left( Y(k) - \left[ \sum_{h=0}^{j-1} g_h \cdot \hat{X}_h(k) \cdot \hat{H}(k) \right] \right) \quad j = 1, 2, \dots, N$$

donde  $\hat{X}_0(k)$  es la estimación del símbolo de transmisión UL en el subcanal  $k$ , es decir,  $\hat{X}_{UL}(k)$ . El resto de  $\hat{X}_h(k)$  serán las capas que estén por encima de la capa a detectar y que habrá que cancelar.  $g$  es el nivel de inyección y  $\hat{H}(k)$  es la estimación del canal.  $\hat{Y}_j(k)$  será el resultado de la capa detectada.

Para la obtención de los datos de cada capa, el proceso se podría definir de la forma indicada a continuación siguiendo el esquema del demultiplexor LDM implementado en la herramienta de simulación:

- **Detección de la señal de la capa superior (UL):** El receptor necesita obtener las estimaciones de los símbolos de transmisión UL,  $\hat{X}_{UL}(k)$ . Esto se logra realizando una detección de la señal UL que incluye, demodulación y decodificación de canal, generando una secuencia de bits de decisión precisa.
- **Regeneración de la señal de la capa superior (UL):** Luego se realiza la codificación y modulación de canal para reconstruir los símbolos de transmisión UL.
- **Cancelación de la señal:** La señal regenerada de la capa superior se almacena en un buffer, y esta se resta a la señal  $Y(k)$  recibida en el receptor.
  
- Para las capas inferiores se monta un bucle, del cual se saldrá cuando se hayan detectado todas las capas.
  - o **Detección de la señal de las capas inferiores (LL):** Con la señal obtenida del cancelador, se lleva a cabo la demodulación y decodificación de canal, obteniendo la secuencia de bits referentes a los datos de la capa.
  - o **Regeneración de la señal de las capas inferiores (LL):** Se realizan los mismos pasos que en la UL, codificación y modulación de canal para reconstruir los símbolos de transmisión LL, pero con un añadido. Habrá que multiplicarlo por su correspondiente nivel de inyección, como se hizo en el multiplexor LDM.
  - o **Cancelación de la señal:** La señal regenerada de la capa inferior se almacena en un buffer, sumándola al resto de señales regeneradas ya almacenadas en él. Por último, esa señal compuesta por todas las señales regeneradas de las capas que estén por encima a la capa a detectar, se resta a la señal  $Y(k)$  recibida en el receptor.

#### 5.2.3.4. Demodulador

Al igual que en el modulador también se hará distinción entre los dos tipos de modulaciones y se crearán dos tipos de objetos que se encargarán de convertir la forma de onda recibida en bits.

Para la modulación por desplazamiento en fase, se ha utilizado el objeto "*comm.PSKDemodulator*" [13]. Este objeto, desmodula la señal de entrada utilizando el método de codificación de cambio de fase M-

aria (M-PSK). Siguiendo la tabla de modulaciones, habrá que crear dos objetos con este tipo de modulación (QPSK y 8PSK).

Para el otro caso, la modulación de amplitud en cuadratura, se ha hecho uso del objeto "*comm.RectangularQAMDemodulator*" [14]. Se creará uno por cada modulación (16-QAM, 64-QAM y 256-QAM).

A la hora de crear estos objetos, se le pasaran algunos parámetros de entrada, entre los que se indicará el número de símbolos, que el tipo de datos de salida del desmodulador sean bits y la varianza del ruido.

En ambos casos, es importante hacer hincapié en la varianza del ruido, ya que el cálculo de la potencia será dependiente del número de capas tal y como se puede apreciar en la ecuación 8.

#### 5.2.3.5. Decodificador LDPC

Para el decodificador LDPC, se generará un objeto *comm.LDPCDecoder* [15], el cual, se encargará de intentar corregir los errores que se hayan podido generar tras el paso de la señal por el canal de simulación.

### 5.3. Criterios de evaluación del sistema

De manera que se pudiera validar la nueva herramienta de simulación desarrollada, se han seguido los mismos criterios de evaluación por los que optaron en el grupo TSR al diseñar la herramienta de simulación de LDM para 2 capas. Se trata de la herramienta utilizada previamente al desarrollo hardware del transmisor y receptor LDM y que más adelante terminó aplicándose en el estándar ATS 3.0.

Entre las opciones configurables, se encuentran los siguientes parámetros:

- Modulación
- Code rate
- Rango SNR
- Nivel de Inyección

Esos cuatro parámetros, se deberán configurar para cada capa. Tal y como se ha mostrado en el esquema del transmisor, los dos primeros son independientes para cada una de ellas, ya que los datos de cada servicio se procesan de forma independiente por sus propios módulos de procesamiento de señal de capa física, que incluyen FEC y modulación.

El nivel de inyección definirá la asignación de potencia entre las capas. Esta variable, se manipulará con el objetivo de controlar el

impacto de la interferencia generada por las capas que estén más abajo, es decir, que tengan un nivel de inyección superior. A lo largo del documento, se mencionaba como las capas inferiores actúan como interferencia sobre las superiores.

Por último, con el rango de SNR, manteniendo la configuración de los otros tres parámetros, para cada valor del vector se calculará un BER. El criterio de evaluación será encontrar el SNR para el cual se obtiene un BER = 0 para todas las capas.

#### 5.4. Validación de la herramienta

Para validar la herramienta, aprovechando los resultados obtenidos en su momento por la herramienta de simulación utilizada para LDM de 2 capas, desarrollada por el grupo TSR de la UPV/EHU, dado que el criterio de evaluación del sistema es el mismo, se puede realizar una comparación y tratar de encontrar similitudes entre ambos resultados.

Cuando se habla de similitud, quiere decir que, por un lado el valor de SNR obtenido con BER = 0 para una misma configuración sea bastante aproximado, ya que la herramienta de TSR es más precisa, es decir, que lleva más bloques de protección, etc. Y por otro lado, que para una misma configuración ambas sigan un mismo patrón.

Mediante los gráficos radiales, se ha realizado una comparativa entre los resultados obtenidos por las dos herramientas, pudiendo comparar múltiples IL y confirmar que la herramienta de simulación desarrollada sigue un mismo patrón que la herramienta del grupo TSR. Como se comentaba, debido a que la herramienta del grupo TSR lleva más bloques de protección contra errores, los umbrales SNR de la nueva herramienta para los cuales se obtiene un BER = 0, efectivamente son más altos.

- Herramienta de simulación LDM 2 Layer del grupo TSR
- Herramienta de simulación LDM Multilayer

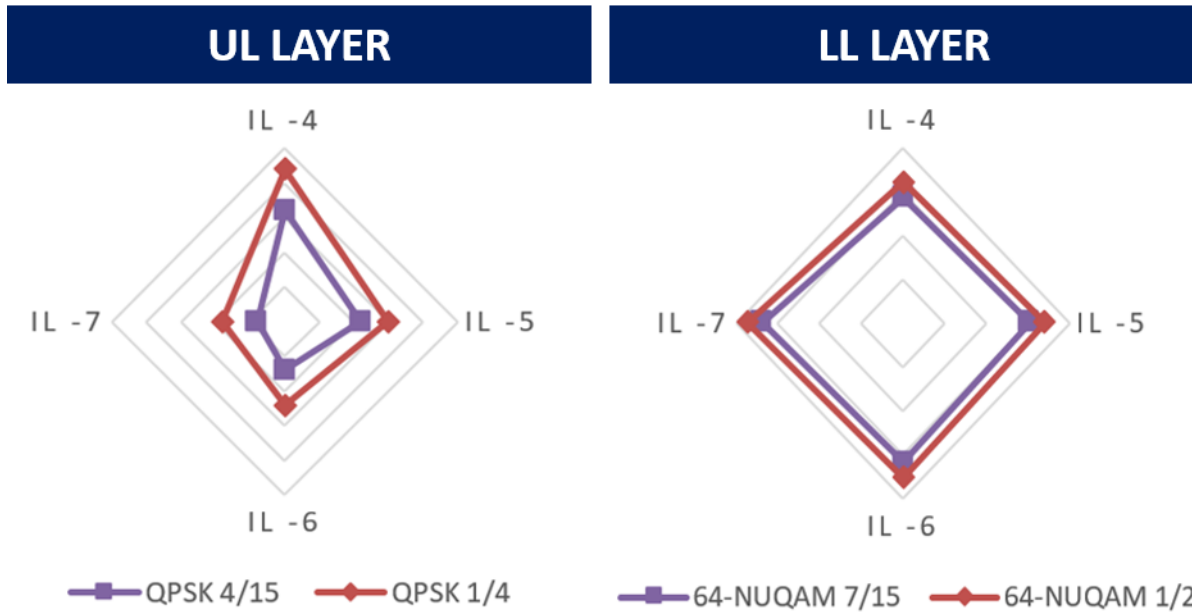


Gráfico 1: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 64-QAM 1/2 (LL)

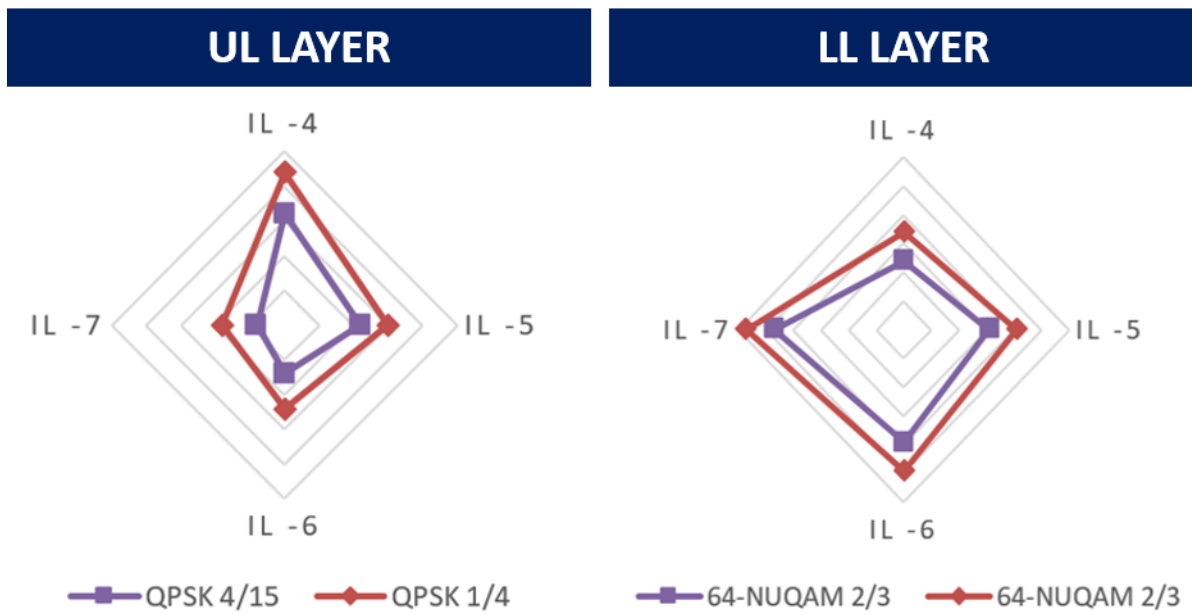


Gráfico 2: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 64-QAM 2/3 (LL)



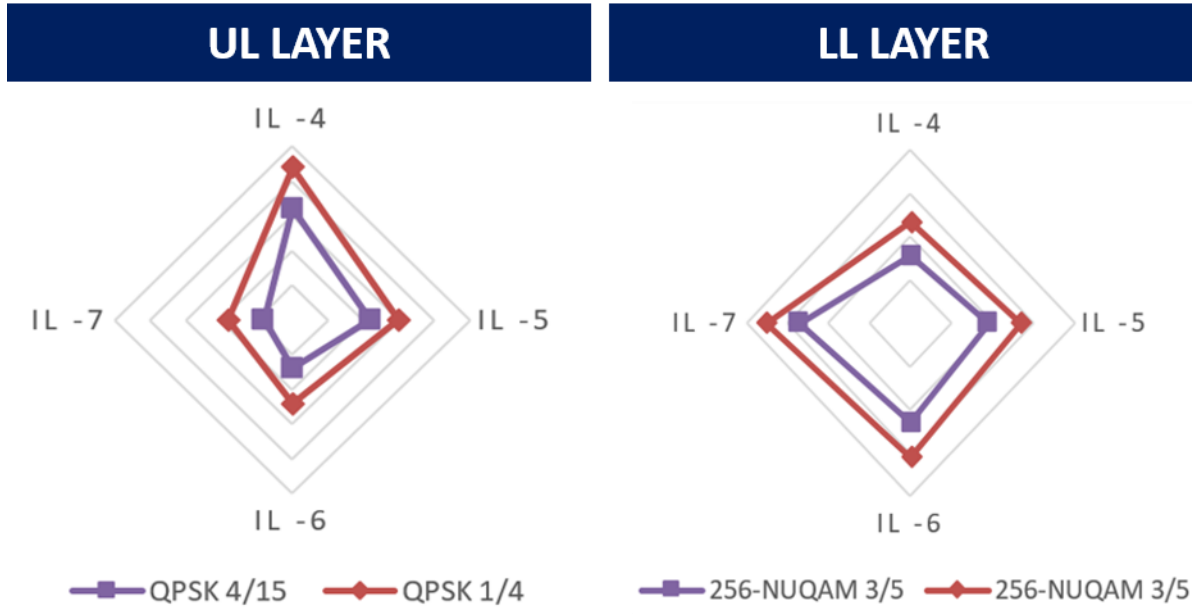


Gráfico 3: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 256-QAM 3/5 (LL)

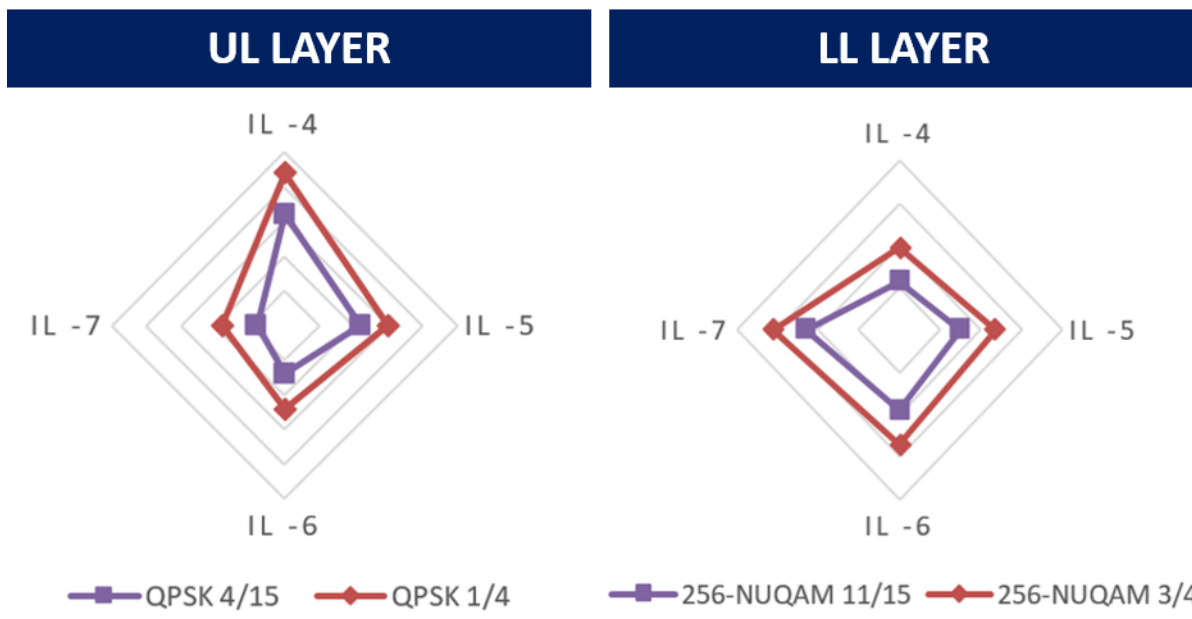


Gráfico 4: Patrones de validación de la herramienta de simulación para QPSK 1/4 (UL) y 256-QAM 3/4 (LL)

Se puede apreciar cómo, manteniendo la configuración de la modulación y el CR tanto en la capa de arriba como en la de abajo, los resultados con ambas herramientas siguen el mismo patrón al variar el IL.

## 5.5. Definición de los escenarios

Para determinar los escenarios de simulación, se partirá del caso de uso de LDM ya existente en ATSC 3.0 para dos capas.

Por un lado, la señal UL se configuró para brindar servicios robustos a receptores móviles, portátiles y de interior. Para ofrecer servicios móviles robustos con áreas de cobertura decentes, la señal UL en un sistema LDM está diseñada para tener una mayor potencia de transmisión y utilizar una codificación y modulación de canal muy fuerte, es decir, código de tasa de 1/4 para el codificador LDPC y modulación QPSK.

Por otro lado, el LL se diseñó para entregar servicios que generalmente requieren SNR mucho más altos para una recepción exitosa, permitiendo disponer de una codificación de canal más débil y una constelación de señal más grande.

Por tanto, para las primeras simulaciones, se propone seguir con el mismo criterio. Analizar la respuesta de LDM al aumentar el número de capas, donde las primeras capas sean robustas y las inferiores orientadas a la alta capacidad de transmisión. Es decir, continuando con posibles avances para los estándares de televisión como ATSC 3.0, se evaluará el rendimiento de LDM al añadir múltiples capas QPSK en la parte superior y varias con la configuración 256-QAM multiplexadas con un IL mayor.

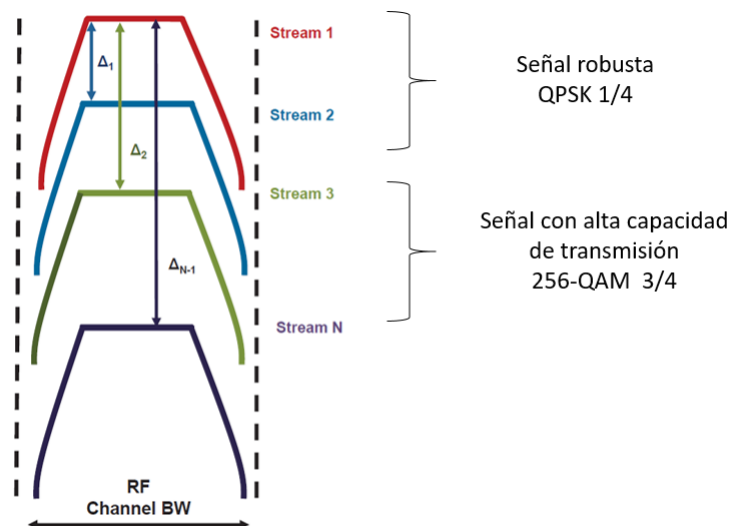


Gráfico 5: Escenario de simulación orientado al entorno de la TDT

En la introducción, se hacía mención uno de los conceptos en desarrollo, el IoT. Está orientado a dispositivos inalámbricos conectados a Internet. Por consiguiente, a raíz de este nuevo criterio, se considera un escenario donde se trate de tener el mayor

número de capas robustas. Se analizara la evolución de ir añadiendo cada vez más capas con la configuración QPSK 1/4.

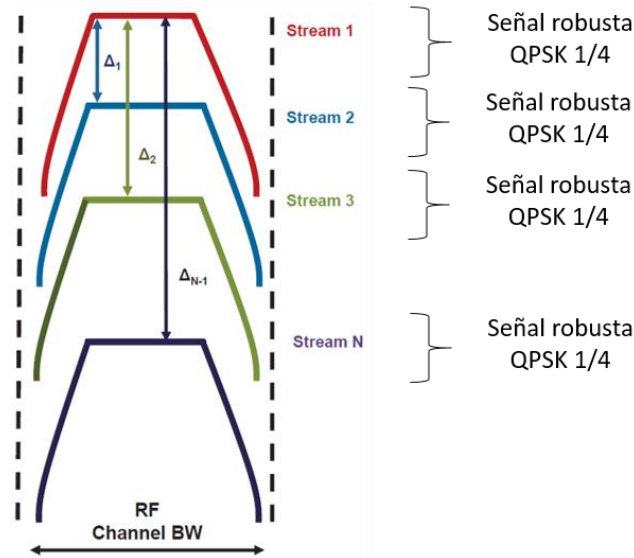


Gráfico 6: Escenario de simulación orientado al entorno IoT

Hasta ahí los escenarios principales. No obstante, se simularán también otros casos para evaluar todas las combinaciones posibles entre las configuraciones disponibles, ya que podrían dar lugar a nuevos escenarios no tenidos en cuenta inicialmente.

### 5.6. Resultados

Algunas de las simulaciones más representativas, se muestran de manera gráfica, ya que de esta forma se facilita su visualización. Además ofrece una mejor perspectiva del impacto de aumentar el número de capas o el cambiar la configuración de alguna de ellas.

Tabla 5: Cálculo de la mínima intensidad de campo en un sistema DVB-T2 8 MHz a 650 MHz [23]

DVB-T2 en Banda IV/V			Fija	Portátil en exteriores/urbanos	Portátil en exteriores/urbanos
Frecuencia	Freq	MHz	650	650	650
Mínima C/N requerida por el sistema	C/N	dB	20,0	17,9	18,3
Variante del sistema (ejemplo)			MAQ-256 FEC 2/3, 32k, PP7 Ampliada	MAQ-64 FEC 2/3, 32k, PP4 Ampliada	MAQ-64 FEC 2/3, 16k, PP1 Ampliada
Velocidad binaria (valores indicativos)		Mbit/s	35-40	26-29	23-28

En la recomendación UIT-R BT.2033, tal y como se muestra en la tabla de arriba, se indica que para una recepción fija la mínima SNR requerida para el sistema son unos 20 dB y para una recepción portátil aproximadamente unos 18 dB. Aunque en el caso de la herramienta de simulación el ancho de banda sea de 6 MHz, la variación del umbral SNR no sería excesivamente notoria. Por tanto,

teniendo en consideración esas recomendaciones, se establecen esos umbrales que valdrán como aproximación para evaluar el alcance de LDM en ese tipo de escenarios. Para la recepción móvil en cambio, se buscara obtener resultados de SNR cercanos al cero.

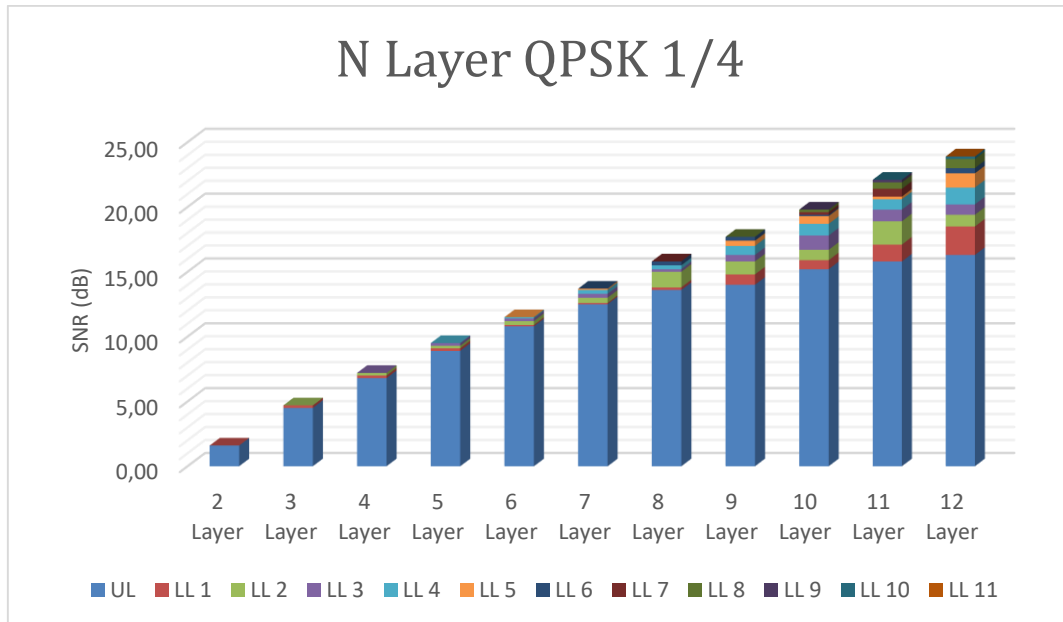


Gráfico 7: Umbral SNR en dB para N capas con modulación QPSK 1/4

En cuanto a tratar de maximizar el número de capas con configuración QPSK 1/4, con el objetivo de su uso en entornos de recepción móvil, se determina que se podría llegar a emplear el uso de hasta dos capas. A partir de la tercera capa, los umbrales SNR se alejan de los valores cercanos al cero. No obstante, podría valorarse su empleo en otros entornos como el portátil, donde podría llegar a utilizarse aproximadamente diez capas con este tipo de configuración.

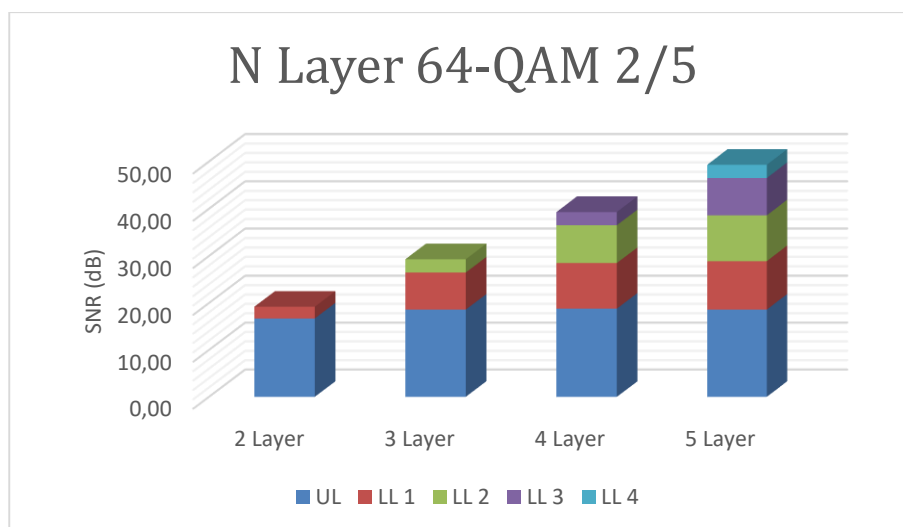


Gráfico 8: Umbral SNR en dB para N capas con modulación 64-QAM 2/5

También se han realizado simulaciones para ver la evolución de ese mismo escenario pero con la configuración 64-QAM 2/5 en todas ellas. Con los umbrales de SNR obtenidos, considerando su uso para un servicio en entornos portátiles, se determina que su uso se limita también únicamente a dos capas.

Otro de los escenarios mencionados, era el planteamiento de una posible mejora en servicios de la TDT.

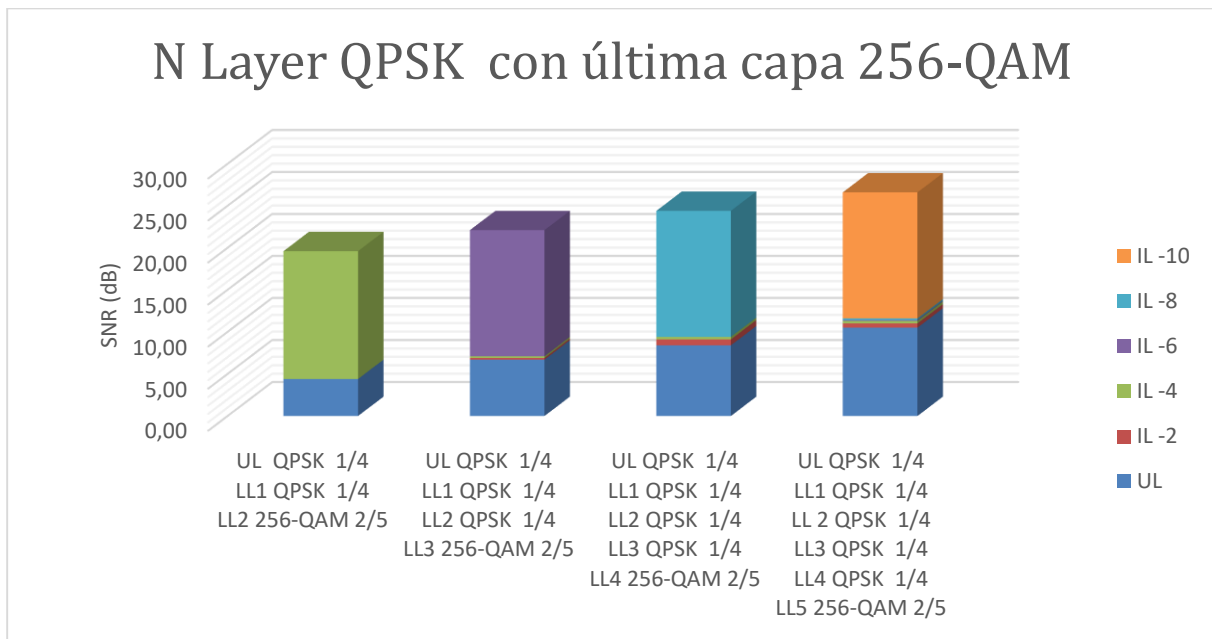


Gráfico 9: Umbrales SNR en dB para N capas QPSK y la última capa de 256-QAM

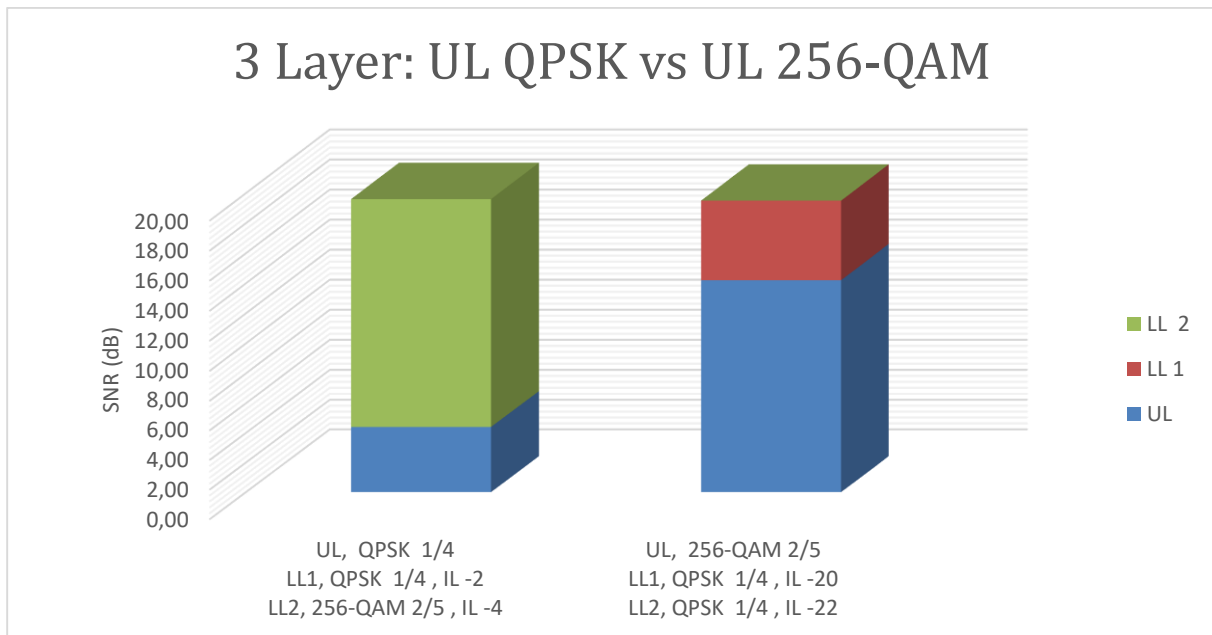


Gráfico 10: Comparación entre configuración con capa superior UL robusta vs poco robusta

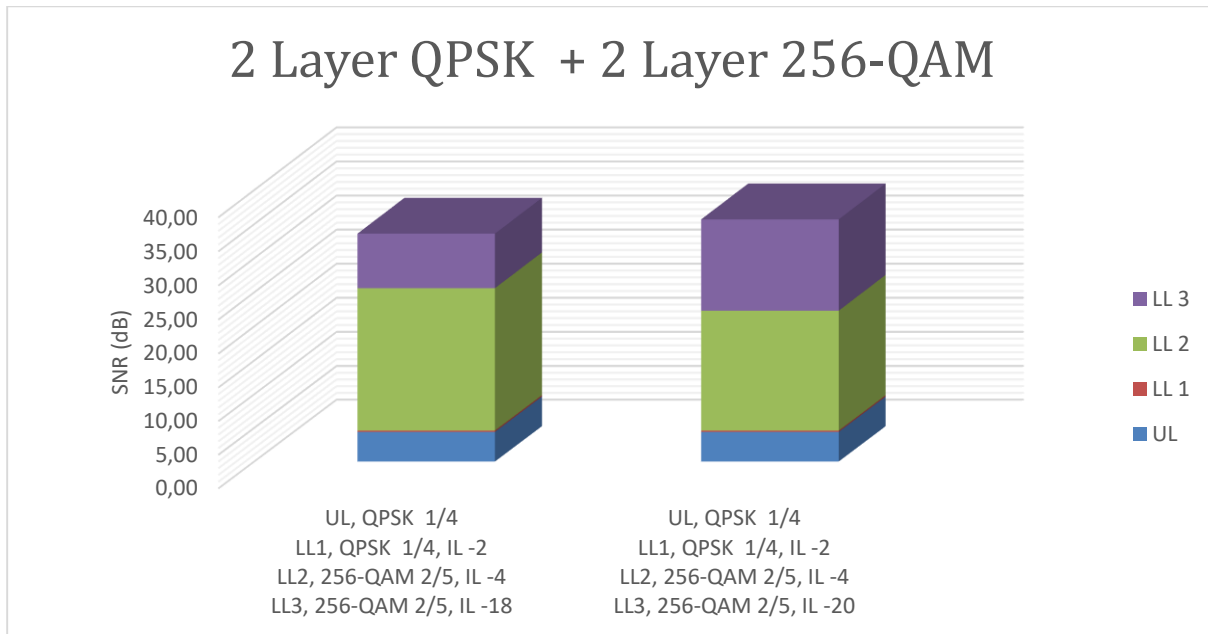


Gráfico 11: Umbrales SNR en dB para 2 capas QPSK más 2 capas de 256-QAM

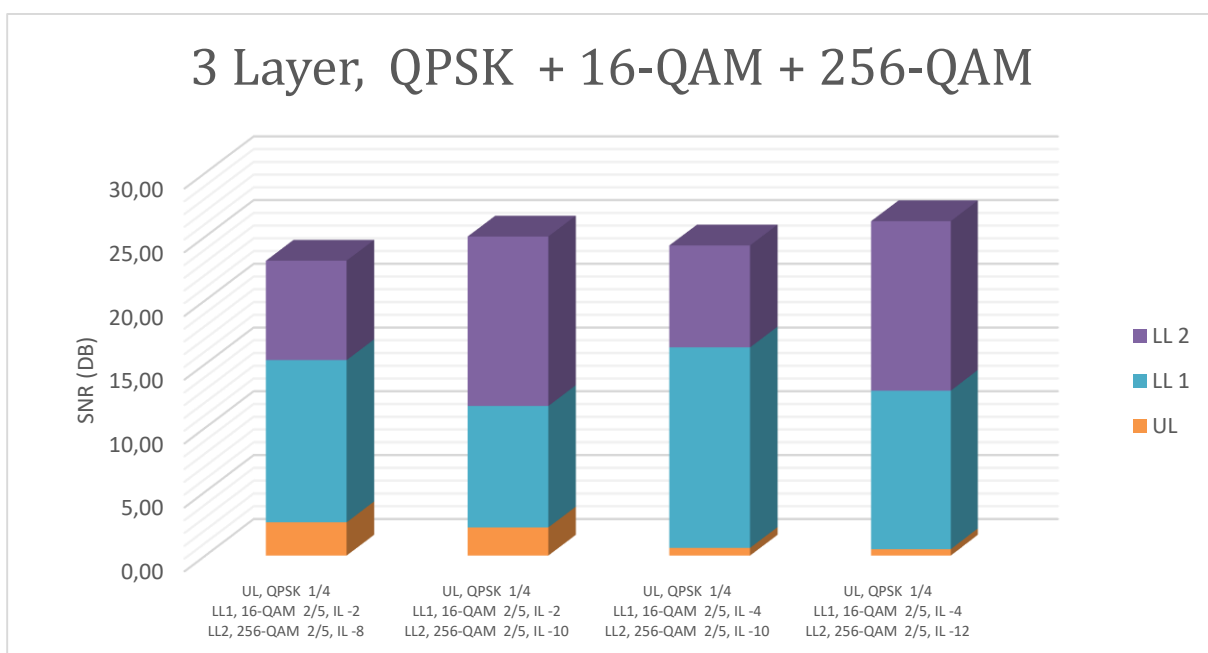


Gráfico 12: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija (QPSK + 16-QAM + 256-QAM)

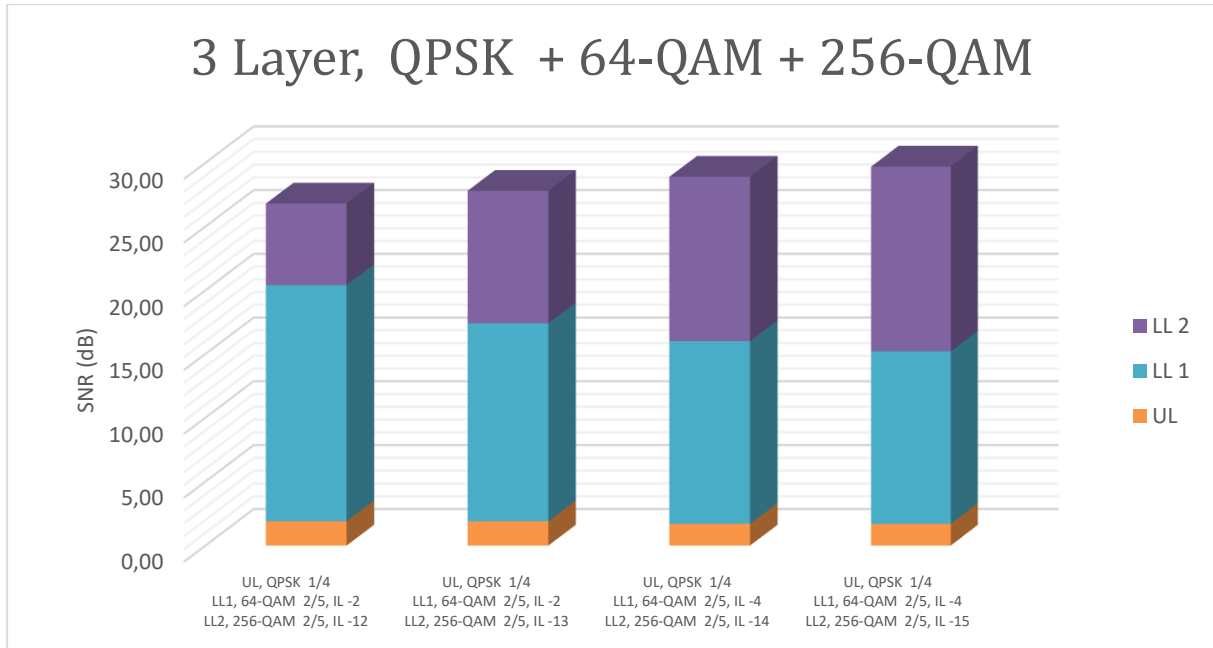


Gráfico 13: Umbral SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija (QPSK + 64-QAM + 256-QAM)

Evaluando los resultados, se llega a la conclusión de que no es posible añadir más capas al planteamiento de ATSC 3.0 manteniendo el criterio de capa superior para la recepción móvil y capa inferior para la recepción fija. Tampoco aplicando el criterio contrario. No obstante, viendo los resultados de N capas con configuración robusta QPSK 1/4, se plantea un escenario en el que en vez de emplear una segunda capa con una configuración poco robusta y orientada a la alta capacidad de transmisión de datos, en su lugar, se haga uso de múltiples capas poco robusta que combinándolas se llegue a obtener el mismo bitrate o incluso uno mayor.

Tabla 6: Bitrate útil (Mbit/s) para canales de 6 MHz [6]

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,732	4,147	4,391	4,524
	2/3	4,976	5,529	5,855	6,032
	3/4	5,599	6,221	6,587	6,786
	5/6	6,221	6,912	7,318	7,540
	7/8	6,532	7,257	7,684	7,917
16-QAM	1/2	7,465	8,294	8,782	9,048
	2/3	9,953	11,059	11,709	12,064
	3/4	11,197	12,441	13,173	13,572
	5/6	12,441	13,824	14,637	15,080
	7/8	13,063	14,515	15,369	15,834
64-QAM	1/2	11,197	12,441	13,173	13,572
	2/3	14,929	16,588	17,564	18,096
	3/4	16,796	18,662	19,760	20,358
	5/6	18,662	20,735	21,955	22,620
	7/8	19,595	21,772	23,053	23,751

Partiendo de la base, de que la herramienta de simulación emplea un ancho de banda de 6 MHz y un intervalo de guarda de 1/8, mientras con una configuración de 256-QAM 2/5 se obtiene aproximadamente un bitrate de unos 20 Mbits/s, haciendo uso de 11 capas QPSK 1/4 se obtendrían unos 23 Mbits/s.

## 6. Planificación

En la planificación se detallara el trabajo realizado para alcanzar los objetivos. La investigación se ha desglosado en varias fases, a su vez descompuestas en tareas, describiendo cada una de ellas y especificando el esfuerzo aplicado. También se han marcado unos puntos de control (hitos) para llevar a cabo un seguimiento y saber si el proyecto va de acuerdo a lo previsto. Asimismo, el fin de algunas de estas fases o tareas conllevan la generación de unos documentos o entregables.

### 6.1. Equipo de trabajo

A continuación se describe el equipo de trabajo que se encargara del desarrollo del proyecto así como la responsabilidad que tendrá cada uno de los miembros que lo integran.

Tabla 7: Recursos Humanos

Identificador	Nombre	Responsabilidad
P.A.	Pablo Angueira	Director de proyecto
J.M.	Jon Montalban	Investigador sénior
G.P.	Gorka Pujana	Investigador junior

### 6.2. Definición de las fases y tareas de trabajo

Tabla 8: P.T.1: Coordinación, gestión y supervisión del proyecto

P.T.1: Coordinación, gestión y supervisión del proyecto		
<b>Inicio:</b> 26/10/2018	<b>Fin:</b> 07/06/2019	<b>Duración:</b> 30 semanas
<p><b>T.1.1 Gestión y seguimiento del proyecto:</b> Se hará un seguimiento para el control del desarrollo de cada tarea del proyecto. En esta fase se realizan principalmente las tareas de gestión del proyecto, es decir, evaluar los avances del proyecto, organizar los recursos, etc.</p>		
<p><b>T.1.2 Definición de objetivos:</b> Se determinaran cuáles son los objetivos generales y específicos del proyecto, de manera que quede establecido lo que se pretende lograr con el desarrollo del proyecto.</p>		
<p><b>T.1.3 Determinación del plan de trabajo:</b> Se determinaran cuáles serán los pasos a seguir para llegar a alcanzar los objetivos previamente definidos.</p>		
<p><b>UE.1.2</b> Especificaciones de los objetivos establecidos</p>		



Tabla 9: P.T.2: Estudios previos

P.T.2: Estudios previos		
<b>Inicio:</b> 30/10/2018	<b>Fin:</b> 23/11/2018	<b>Duración:</b> 4 semanas
<p><b>T.2.1 Estudio del Estado del Arte:</b> En esta actividad se analizará la biografía relacionada con el tema. Se buscará y se recopilará información sobre la tecnología que se pretende desarrollar. Esa información se usará como base para el desarrollo del proyecto. Se comenzará leyendo acerca de los desarrollos de LDM llevados a cabo para uso en el estándar ATSC 3.0 y los estudios teóricos acerca de LDM multilayer. También se hará una revisión del estándar DVB con el objetivo de conocer los diferentes bloques que componen un sistema de comunicación.</p> <p><b>H.2.1 Reunión Informativa:</b> Reunión para aclaraciones y posibles dudas acerca de los conocimientos adquiridos.</p>		
No hay entregables		

Tabla 10: P.T.3: Desarrollo herramienta de simulación de un sistema de comunicaciones convencional

P.T.3: Desarrollo herramienta de simulación de un sistema de comunicaciones convencional		
<b>Inicio:</b> 26/11/2018	<b>Fin:</b> 18/01/2019	<b>Duración:</b> 6 semanas
<p><b>T.3.1 Base del sistema de comunicación:</b> Simulación de un sistema de comunicación básico en el que la señal se modula con QPSK y luego se somete a multiplexación OFDM. La señal pasa a través de un canal AWGN antes de ser demultiplexada y demodulada. Por último, se calcula el número de errores de bit (BER).</p> <p><b>T.3.2 Modulación:</b> Técnicas de modulación para obtener un canal de comunicación más óptimo y productivo.</p> <p><b>T.3.2.1 Modulación PSK:</b> Modulación en fase para señales más robustas.</p> <p><b>T.3.2.2 Modulación QAM:</b> Modulación en cuadratura para señales con mayor capacidad de transmisión.</p> <p><b>T.3.3 Codificación de canal:</b> Técnicas de codificación para protección contra errores.</p> <p><b>T.3.3.1 Códigos LDPC:</b> inclusión de bits de paridad en la transmisión para proporcionar capacidades detectoras y correctoras al código transmitido.</p> <p><b>T.3.3.2 Entrelazado:</b> protección frente a los errores de ráfaga.</p> <p><b>H.3 Reunión de seguimiento:</b> Reunión para evaluación de la herramienta.</p>		
<p><b>UE.3</b> Simulaciones de prueba de la herramienta de simulación del sistema de comunicaciones convencional</p>		

Tabla 11: P.T.4: Multiplexación LDM

P.T.4: Multiplexación LDM		
<b>Inicio:</b> 21/01/2019	<b>Fin:</b> 22/02/2019	<b>Duración:</b> 5 semanas
<p><b>T.4.1 Multiplexación LDM para 2 capas:</b> Incluir Multiplexador LDM en el transmisor; también añadir bloque de detección, cancelación y regenerador de la señal en el receptor.</p> <p><b>T.4.2 Validación de la herramienta:</b> Simulaciones para validación del correcto funcionamiento de la herramienta. Comparación con los resultados obtenidos por la herramienta de simulación LDM 2 layer diseñada por el grupo TSR.</p> <p><b>H.4.2 Reunión de seguimiento:</b> Reunión para evaluación de la calidad de la herramienta.</p> <p><b>T.4.3 Optimización del código:</b> Optimización del código con el objetivo de reducir los tiempos de simulación y disponer el desarrollo de una forma más ordenada.</p> <p><b>T.4.4 Ampliación de la multiplexación LDM a 3 capas:</b> Incluir una capa más de forma que se obtenga una idea de cómo obtener de forma iterativa la multiplexación/demultiplexación de N capas.</p> <p><b>T.4.5 Método iterativo para la multiplexación y demultiplexación LDM N capas:</b> Desarrollar un multiplexor de N capas en el transmisor. Implementar también un demultiplexor que permita detectar, cancelar y regenerar las N capas de forma iterativa.</p> <p><b>H.4.5 Reunión de seguimiento:</b> Reunión para evaluación de la herramienta.</p>		
<p><b>UE.4.2</b> Resultados de la herramienta de simulación para LDM 2 capas y comparativa</p> <p><b>UE.4.4</b> Resultados de la herramienta de simulación para LDM 3 capas</p> <p><b>UE.4.5</b> Herramienta de simulación para LDM N capas</p>		

Tabla 12: P.T.5: Simulaciones

P.T.5: Simulaciones		
<b>Inicio:</b> 25/02/2019	<b>Fin:</b> 17/04/2019	<b>Duración:</b> 8 semanas
<p><b>T.5.1 Definición del escenario:</b> se determinaran diferentes casos de simulación con el objetivo de obtener unos resultados que permitan llegar a unas conclusiones claras acerca del rendimiento de la tecnología LDM.</p> <p><b>H.5.1 Reunión de seguimiento:</b> Reunión para determinar los escenarios de simulación.</p> <p><b>T.5.2 Simulaciones:</b> Siguiendo los casos definidos, llevar a cabo las simulaciones realizando las modificaciones necesarias en los diferentes parámetros configurables que ofrece la herramienta.</p>		
<p><b>UE.5.1</b> Especificaciones de los diferentes escenarios a evaluar</p> <p><b>UE.5.2</b> Resultados de las simulaciones</p>		

Tabla 13: P.T.6: Análisis y evaluación de los resultados

P.T.6: Análisis y evaluación de los resultados		
<b>Inicio:</b> 29/04/2019	<b>Fin:</b> 03/05/2019	<b>Duración:</b> 1 semana
<p><b>T.6.1 Análisis y evaluación de los resultados:</b> Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones y evaluar los resultados.</p> <p><b>T.6.2 Determinación de nuevos escenarios:</b> Determinar nuevos escenarios de aplicación a raíz de las conclusiones obtenidas.</p>		
<b>UE.6</b> Conclusiones de las simulaciones y nuevos escenarios de aplicación		

Tabla 14: P.T.7: Documentación

P.T.7: Documentación		
<b>Inicio:</b> 06/05/2019	<b>Fin:</b> 07/06/2019	<b>Duración:</b> 5 semanas
<p><b>T.7.1 Memoria del proyecto:</b> Plasmear todos los pasos seguidos en el desarrollo del proyecto.</p>		
<b>UE.7</b> Memoria del proyecto		

### 6.3. Hitos

Para que el director del proyecto pueda seguir el desarrollo del mismo, será necesario realizar una serie de reuniones con el equipo de trabajo para asegurarse de que se sigue la planificación, es decir, que se van cumpliendo los objetivos en el plazo propuesto.

A continuación se presenta una tabla que recoge los hitos establecidos para el control del proyecto.

Tabla 15: Hitos de control

Identificador	Descripción	Fecha
<b>H.2.1</b>	Reunión informativa	23/11/2018
<b>H.3</b>	Reunión de seguimiento	18/01/2019
<b>H.4.2</b>	Reunión de seguimiento	01/02/2019
<b>H.4.5</b>	Reunión de seguimiento	22/02/2019
<b>H.5.1</b>	Reunión de seguimiento	25/02/2019

## 6.4. Unidades Entregables

A continuación se reúnen las unidades de entrega indicadas en la programación del proyecto y las fechas previstas. Las unidades de entrega son una serie de documentos o informes que se van generando a los largo de la vida del proyecto, y que sirven para reflejar los resultados puntuales alcanzados.

Tabla 16: Unidades Entregables

Identificador	Descripción	Fecha
<b>UE.1.2</b>	Especificaciones de los objetivos establecidos	29/10/2018
<b>UE.3</b>	Simulaciones de prueba de la herramienta de simulación del sistema de comunicaciones convencional	17/01/2019
<b>UE.4.2</b>	Resultados de la herramienta de simulación para LDM 2 capas y comparativa	31/01/2019
<b>UE.4.4</b>	Resultados de la herramienta de simulación para LDM 3 capas	08/02/2019
<b>UE.4.5</b>	Herramienta de simulación para LDM N capas	22/02/2019
<b>UE.5.1</b>	Especificaciones de los diferentes escenarios a evaluar	26/02/2019
<b>UE.5.2</b>	Resultados de las simulaciones	17/04/2019
<b>UE.6</b>	Conclusiones de las simulaciones y nuevos escenarios de aplicación	03/05/2019
<b>UE.7</b>	Memoria del proyecto	07/06/2019

### 6.5. Diagrama de Gantt

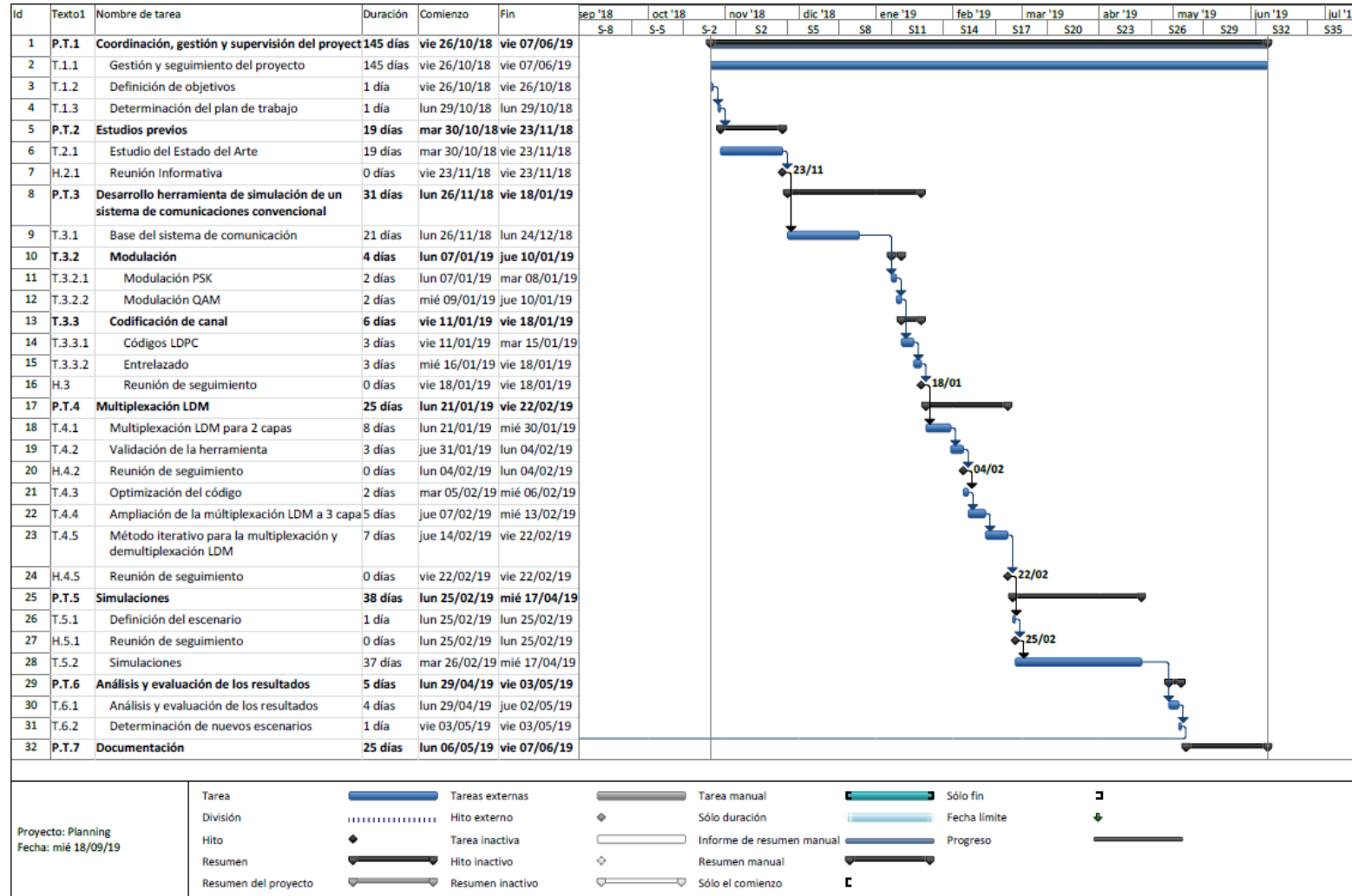


Ilustración 19: Diagrama de Gantt

## 7. Presupuesto

### 7.1. Recursos Humanos

A continuación, se muestra una tabla con las horas dedicadas por cada uno de los integrantes del equipo de trabajo junto con el coste unitario (€/h) asociado.

Tabla 17: Coste unitario Recursos Humanos

Identificador	Nombre	Responsabilidad	Tasa horaria
P.A.	Pablo Angueira	Director de proyecto	55 €
J.M.	Jon Montalban	Investigador sénior	40 €
G.P.	Gorka Pujana	Investigador junior	30 €

Tabla 18: Presupuesto total horas internas

Identificador	Tasa horaria	Horas	Coste
P.A.	55 €	14	770 €
J.M.	40 €	60	2.400 €
G.P.	30 €	1052	31.560 €
		<b>Total</b>	<b>34.730 €</b>

### 7.2. Amortizaciones

En este apartado se expone la relación existente entre cada uno de los recursos materiales empleados para la elaboración del proyecto y el coste de cada uno.

Tabla 19: Amortizaciones

Inversión	Valor compra	Vida útil	Tiempo de uso	Amortización
Licencia Matlab	2.000 €	2 años	7 meses	586,30 €
Licencia Microsoft Office	250 €	1 año	7 meses	175 €
Ordenador	850 €	5 años	7 meses	99,17 €
			<b>Total</b>	<b>860,47 €</b>

### 7.3. Gastos

En la sección de gastos se indican los materiales que una vez usados no se pueden volver a utilizar, y por lo tanto, no pueden ser indicados en el apartado de amortizaciones.

Tabla 20: Gastos

Gasto	Coste
Material oficina	50 €
Internet	20 €
Otros gastos	40 €
<b>Total</b>	<b>110 €</b>

## 7.4. Resumen económico

Finalmente, se hace un resumen del presupuesto total necesario para llevar a cabo el proyecto.

*Tabla 21: Resumen presupuesto final*

<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Horas internas	34.730 €
Amortizaciones	860,47 €
Gastos	110 €
<b>Total</b>	<b>35.700,47 €</b>

## 8. Conclusiones

Cuando se trata de tener el mayor número de capas posibles, los resultados muestran como la opción más viable es utilizar configuraciones robustas. Esto se debe a que los errores que se generan en la detección de las capas superiores se van arrastrando al tratar de reconstruir la señal de esa capa para cancelarla de la señal principal, dificultando la detección de las capas inferiores.

Configurando las capas superiores para alta capacidad de transmisión de datos, al necesitar la primera capa una SNR alta para llevar a cabo su codificación, hace que las capas inferiores también necesiten una SNR alta y superior a la de la primera capa. Con este concepto, analizando los resultados obtenidos, se pueden determinar dos resultados. Por un lado, añadir capas inferiores robustas, en principio no tendría gran utilidad ya que este tipo de configuraciones se suelen utilizar en recepción móvil, donde es importante tener SNR bajas debido al tipo de receptores que se usan en esos casos. Por otro lado, añadiendo otra capa poco robusta, el SNR necesario para la detección de la señal pasa a ser casi el doble que el de la capa superior. Sin embargo, se ha demostrado que sería posible utilizar múltiples capas robustas, alcanzando un mayor bitrate que con una única capa poco robusta orientada a la alta capacidad de transmisión de datos.

Otra de las conclusiones a la que se ha llegado analizando los resultados de LDM 2 Layer adjuntos en el Anexo II, es que dependiendo el tipo de configuración utilizada para cada capa, afectará en el IL mínimo que haya que dejar respecto a la siguiente capa que vaya a ser multiplexada por potencia por debajo de esta, sin importar la configuración empleada para esa capa inferior.

*Tabla 22: IL mínimo entre dos capas en base a la configuración de la capa superior*

Configuración	IL (dB) mínimo
QPSK 1/4	2
64-QAM 2/5	10
256-QAM 2/5	14

Tratando de utilizar una IL inferior en esos casos expuestos, la herramienta no ha sido capaz de obtener una SNR menor a 50 dB con la que obtener un BER = 0 para todas las capas. Además, en el resto de simulaciones donde se emplean más de dos capas, también se puede apreciar como esa separación mínima del IL son necesarias y que no se han logrado obtener resultados satisfactorios por debajo de esos umbrales.

Como opción de mejora para los servicios de TDT, se podría realizar una configuración de tres capas donde, la capa superior vaya



dirigida a la recepción móvil, la del medio a portátiles (para dispositivos más grandes que los teléfonos móviles y que necesiten un poco más de calidad de imagen) y la inferior para fijo.

Resumiendo, hay varios caminos que podrían tomarse para aprovechar las ventajas ofrecidas por LDM. Además, una de las mejoras ofrecidas por LDM a tener en cuenta, es que es posible el empleo de al menos dos capas en casi cualquier entorno de recepción, obteniendo así un uso más eficiente del espectro. Por tanto, debería ampliarse su uso en otras aplicaciones además de la TDT.

Por otro lado, hasta ahora, se había limitado el uso de LDM únicamente para el empleo de dos capas. En este trabajo fin de máster, se está tratando de romper esos límites llevando a cabo una evaluación de LDM Multilayer. Otro propuesta a futuro, podría ser romper otro de los límites de LDM. Para poder obtener un receptor de baja complejidad, todas las capas comparten la misma estructura de señal OFDM (FFT, CP...). Sin embargo, en LDM eso no es obligatorio. Por tanto, podría llevarse a cabo el análisis de un sistema LDM donde cada señal lleve su propia modulación OFDM configurada de forma independiente. Esto quizás podría dar lugar a que convivieran diferentes tipos de tecnologías, como por ejemplo las operadoras de telefonía móvil y la televisión, que tienen una lucha continua por un ancho de banda del espectro radioeléctrico.

## 9. Referencias

- [1] Jae-young Lee, Sung-Ik Park, Sunhyoung Kwon, Bo-Mi Lim, Sungjun Ahn, Namho Hur, Heung Mook Kim, Jeongchang Kim, “*Layered Division Multiplexing for ATSC 3.0: Implementation and Memory Use Aspects*”, IEEE Transactions on Broadcasting, February 2019.
- [2] Liang Zhang, Yiyang Wu, Wei Li, Bo Rong, Khalil Salehian, Sebastien Lafleche, Xianbin Wang, Sung Ik Park, Heung Mook Kim, Jae-young Lee, Namho Hur, Pablo Angueira, Jon Montalban, “*Layered-Division-Multiplexing for High Spectrum Efficiency and Service Flexibility in Next Generation ATSC 3.0 Broadcast System*”, IEEE Wireless Communications (Volume: 26, Issue: 2, April 2019).
- [3] Pablo Angueira, Jon Montalban, October 2014, “*Layered Division Multiplexing: A technique to make flexible use of the broadcast spectrum*”.
- [4] Liang Zhang, Senior Member, IEEE, Wei Li, Member, IEEE, Yiyang Wu, Fellow, IEEE, Xianbin Wang, Senior Member, IEEE, Sung-Ik Park, Senior Member, IEEE, Heung Mook Kim, Member, IEEE, Jae-Young Lee, “*Layered-Division-Multiplexing: Theory and Practice*”.
- [5] Pablo Angueira, Senior Member, IEEE, Jon Montalban, J. Montalban, J. Barrueco, P. Angueira, L. Zhang, Y. Wu, W. Li, H-M. Kim, S-I. Park, J-Y. Lee, “*Asynchronous N-Layered Division Multiplexing (N-LDM)*”, 2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB).
- [6] ETSI EN 302 755: “*Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*”.
- [7] Antonio Artés Rodríguez, Fernando Pérez González, Jesús Cid Sueir, Roberto López Valcarce, Carlos Mosquera Nartallo, Fernando Pérez Cruz, 2012, “*Comunicaciones digitales*”.
- [8] Simon R. Saunders, Alejandro Aragón Zavala, “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”.
- [9] Matlab: Encode binary low-density parity-check code. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.ldpcencoder-system-object.html>
- [10] Matlab: Low-density parity-check codes from DVB-S2 standard. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/dvbs2ldpc.html>
- [11] Matlab: Modulate using M-ary PSK method. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.pskmodulator-system-object.html>
- [12] Matlab: Modulate using rectangular QAM signal constellation. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.rectangularqammodulator-system-object.html>
- [13] Matlab: Demodulate using M-ary PSK method. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.pskdemodulator-system-object.html>
- [14] Matlab: Demodulate using rectangular QAM signal constellation. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.rectangularqamdemodulator-system-object.html>
- [15] Matlab: Decode binary low-density parity-check code. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.ldpcdecoder-system-object.html>
- [16] L. Zhang and W. Li and Y. Wu and Z. Hong and P. Angueira and J. Montalban and M. Velez and S. I. Park and H. M. Kim and J. Y. Lee, “*Performance Characterization and Optimization of Mobile Service Delivery in LDM-based Next Generation DTV Systems*”, IEEE Trans. on Broadcasting, vol. 61, no. 4, Dec. 2015.
- [17] S. Park, J. Lee, S. Kwon, H. Kim, N. Hur, L. Zhang, Y. Wu, J. Montalban, P. Angueira, S. Myoung, and J. Kim, “*Low Complexity Layered Division Multiplexing System for ATSC 3.0*”, IEEE Trans. on Broadcasting, vol. 62, no. 1, March 2016.
- [18] Dividendo digital. Recuperado de: <https://www.televisiondigital.gob.es/dividendodigital/Paginas/dividendo-digital.aspx>
- [19] Espectro radioeléctrico. Recuperado de: <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sistemas-MINTIC/SGE-Sistema-de-Gestion-del-Espectro/Informacion-General/2350:Espectro-Radioelectrico>

- [20] Industria 4.0. Recuperado de:  
<https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html>
- [21] David Gómez-Barquero, Osvaldo Siemone, “*LDM Versus FDM/TDM for Unequal Error Protection in Terrestrial Broadcasting Systems: An Information-Theoretic View*”.
- [22] IoT – Internet of Things. Recuperado de:  
<https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/IoT-internet-of-things.html>
- [23] Recomendación UIT-R BT.2033-1, “*Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, para la segunda generación de los sistemas de radiodifusión de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas*”, Febrero 2015.

## 10. ANEXO I: Resultados validación herramienta de simulación

Tabla 23: Resultados de la herramienta de simulación LDM de dos capas del grupo TSR para un canal AWGN

Layer	Constelación	CR	IL -4	IL -5	IL -6	IL -7
<i>UL</i>	QPSK	4/15	-0,40	-0,90	-1,30	-1,60
<i>LL</i>	64-NUQAM	7/15	14,40	15,20	15,90	16,80
<i>UL</i>	QPSK	4/15	-0,40	-0,90	-1,30	-1,60
<i>LL</i>	64-NUQAM	1/3	18,40	19,10	19,90	20,70
<i>UL</i>	QPSK	4/15	-0,40	-0,90	-1,30	-1,60
<i>LL</i>	256-NUQAM	3/5	21,10	21,80	22,60	23,40
<i>UL</i>	QPSK	4/15	-0,50	-0,90	-1,30	-1,60
<i>LL</i>	256-NUQAM	11/15	24,30	25,00	25,80	26,60

Tabla 24: Resultados herramienta de simulación LDM Multilayer para un canal AWGN

Layer	Constelación	CR	IL -4	IL -5	IL -6	IL -7
<i>UL</i>	QPSK	1/4	0,20	-0,50	-0,80	-1,10
<i>LL</i>	64-NUQAM	1/2	16,20	17,00	17,70	18,60
<i>UL</i>	QPSK	1/4	0,10	-0,30	-0,90	-1,20
<i>LL</i>	64-NUQAM	2/3	19,40	20,10	20,90	21,70
<i>UL</i>	QPSK	1/4	0,10	-0,50	-0,80	-1,20
<i>LL</i>	256-NUQAM	3/5	22,70	23,40	24,20	25,00
<i>UL</i>	QPSK	1/4	0,10	-0,40	-0,80	-1,20
<i>LL</i>	256-NUQAM	3/4	25,90	26,70	27,40	28,20

## 11. ANEXO II: Resultados simulaciones

Tabla 25: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL QPSK 1/4 y capa inferior LL variante

Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
UL	QPSK 1/4	-	1,60	-	0,10	-	-0,90
LL	QPSK 1/4	2	1,60	4	2,90	6	4,50
UL	QPSK 1/4	-	1,60	-	0,10	-	-0,90
LL	16-QAM 2/5	2	8,80	4	10,10	6	11,60
UL	QPSK 1/4	-	1,60	-	0,10	-	-0,90
LL	64-QAM 2/5	2	13,00	4	14,40	6	15,80
UL	QPSK 1/4	-	1,60	-	0,10	-	-0,90
LL	256-QAM 2/5	2	16,60	4	18,00	6	19,50

Tabla 26: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL 64-QAM 2/5 y capa inferior LL variante

Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
UL	64-QAM 2/5	-	17,40	-	10,20	-	9,20
LL	QPSK 1/4	10	17,40	15	12,60	20	17,50
UL	64-QAM 2/5	-	16,50	-	10,20	-	9,20
LL	16-QAM 2/5	10	16,50	15	19,80	20	24,70
UL	64-QAM 2/5	-	16,70	-	10,10	-	9,20
LL	64-QAM 2/5	10	19,20	15	24,00	20	28,90
UL	64-QAM 2/5	-	16,30	-	10,10	-	9,20
LL	256-QAM 2/5	10	23,00	15	27,70	20	32,60

Tabla 27: Umbrales SNR en dB para LDM 2 Layer con capa superior UL 256-QAM 2/5 y capa inferior LL variante

Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
UL	256-QAM 2/5	-	18,80	-	16,80	-	13,50
LL	QPSK 1/4	14	18,80	15	16,80	20	17,60
UL	256-QAM 2/5	-	18,90	-	16,60	-	13,40
LL	16-QAM 2/5	14	18,90	15	19,70	20	24,70
UL	256-QAM 2/5	-	18,70	-	16,60	-	13,40
LL	64-QAM 2/5	14	23,00	15	24,00	20	28,90
UL	256-QAM 2/5	-	18,60	-	16,40	-	13,40
LL	256-QAM 2/5	14	26,70	15	27,70	20	32,60

Tabla 28: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con capa superior robusta

Layer	Modulation	CR	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
UL	QPSK	1/4	-	4,50	-	3,20	-	1,60
LL 1	QPSK	1/4	2	4,70	2	3,50	4	5,60
LL 2	QPSK	1/4	4	4,70	6	6,20	6	5,60
UL	QPSK	1/4	-	4,40	-	3,20	-	1,60
LL 1	QPSK	1/4	2	4,60	2	3,50	4	5,50
LL 2	16-QAM	2/5	4	11,70	6	13,30	6	12,80
UL	QPSK	1/4	-	4,40	-	3,30	-	1,60
LL 1	QPSK	1/4	2	4,60	2	3,30	4	5,60
LL 2	64-QAM	2/5	4	15,90	6	17,60	6	17,00
UL	QPSK	1/4	-	4,40	-	3,30	-	1,60
LL 1	QPSK	1/4	2	4,40	2	3,30	4	5,50
LL 2	256-QAM	2/5	4	19,60	6	21,30	6	20,70

Tabla 29: Umbrales SNR en dB para 2 capas QPSK más 2 capas de 256-QAM

Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR
<b>UL</b>	<b>QPSK 1/4</b>	-	4,40	-	4,40
<b>LL 1</b>	<b>QPSK 1/4</b>	2	4,60	2	4,60
<b>LL 2</b>	<b>256-QAM 2/5</b>	4	25,60	4	22,30
<b>LL 3</b>	<b>256-QAM 2/5</b>	18	33,60	20	35,70

Tabla 30: Umbrales SNR en dB para LDM 3 Layer con configuraciones orientadas a la recepción móvil, portátil y fija

Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
<b>UL</b>	<b>QPSK 1/4</b>	-	2,60	-	2,20	-	0,60	-	0,50
<b>LL 1</b>	<b>16-QAM 2/5</b>	2	15,30	2	11,70	4	16,30	4	12,90
<b>LL 2</b>	<b>256-QAM 2/5</b>	8	23,10	10	25,00	10	24,30	12	26,20
Layer	Configuration	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR	IL	SNR
<b>UL</b>	<b>QPSK 1/4</b>		1,90		1,90		1,70		1,70
<b>LL 1</b>	<b>64-QAM 2/5</b>	2	20,40	2	17,40	2	16,00	2	15,20
<b>LL 2</b>	<b>256-QAM 2/5</b>	12	26,80	13	27,80	14	28,90	15	29,70

Tabla 31: Umbral SNR en dB para N capas con modulación QPSK 1/4

Layer	Modulation	CR	IL	2 Layer	3 Layer	4 Layer	5 Layer	6 Layer	7 Layer	8 Layer	9 Layer	10 Layer	11 Layer	12 Layer
UL	QPSK	1/4	-	1,60	4,50	6,80	8,90	10,80	12,50	13,60	14,00	15,20	15,80	16,30
LL 1	QPSK	1/4	2	1,60	4,70	7,00	9,10	10,90	12,60	13,80	14,80	15,90	17,10	18,50
LL 2	QPSK	1/4	4		4,70	7,20	9,30	11,20	13,00	15,00	15,80	16,70	18,90	19,40
LL 3	QPSK	1/4	6			7,20	9,50	11,40	13,30	15,20	16,30	17,80	19,80	20,20
LL 4	QPSK	1/4	8				9,50	11,50	13,60	15,50	17,00	18,70	20,60	21,50
LL 5	QPSK	1/4	10					11,50	13,70	15,50	17,40	19,30	20,80	22,60
LL 6	QPSK	1/4	12						13,70	15,80	17,70	19,40	20,80	23,00
LL 7	QPSK	1/4	14							15,80	17,70	19,60	21,40	23,00
LL 8	QPSK	1/4	16								17,70	19,80	21,90	23,70
LL 9	QPSK	1/4	18									19,80	22,10	23,70
LL 10	QPSK	1/4	20										22,10	23,90
LL 11	QPSK	1/4	22											23,90

Tabla 32: Umbral SNR en dB para N capas con modulación 64-QAM 2/5

Layer	Modulation	CR	IL	SNR			
				2 Layer	3 Layer	4 Layer	5 Layer
UL	64-QAM	2/5	-	16,70	18,60	18,80	18,60
LL 1	64-QAM	2/5	10	19,20	26,50	28,50	28,90
LL 2	64-QAM	2/5	20		29,30	36,50	38,60
LL 3	64-QAM	2/5	30			39,30	46,50
LL 4	64-QAM	2/5	40				49,30



Tabla 33: Umbral SNR en dB para múltiples capas QPSK 1/4 y la última capa con configuración 256-QAM 2/5

Layer	Configuration	IL	SNR	Layer	Configuration	IL	SNR	Layer	Configuration	IL	SNR	Layer	Configuration	IL	SNR
<i>UL</i>	QPSK 1/4	-	4,40	<i>UL</i>	QPSK 1/4	-	6,70	<i>UL</i>	QPSK 1/4	-	8,40	<i>UL</i>	QPSK 1/4	-	10,50
<i>LL 1</i>	QPSK 1/4	2	4,40	<i>LL 1</i>	QPSK 1/4	2	6,90	<i>LL 1</i>	QPSK 1/4	2	9,10	<i>LL 1</i>	QPSK 1/4	2	11,00
<i>LL 2</i>	256-QAM 2/5	4	19,60	<i>LL 2</i>	QPSK 1/4	4	7,10	<i>LL 2</i>	QPSK 1/4	4	9,40	<i>LL 2</i>	QPSK 1/4	4	11,30
				<i>LL 3</i>	256-QAM 2/5	6	22,10	<i>LL 3</i>	QPSK 1/4	6	9,40	<i>LL 3</i>	QPSK 1/4	6	11,40
								<i>LL 4</i>	256-QAM 2/5	8	24,40	<i>LL 4</i>	QPSK 1/4	8	11,60
												<i>LL 5</i>	256-QAM 2/5	10	26,60