

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA DE COMUNICACIÓN
INALÁMBRICA NOMA**

SIMULACIÓN DE ESTIMACIÓN DE CANAL EN LA TÉCNICA NOMA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

ALEX FERNANDO CONTERÓN PICUASI

alex.conteron@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO

diego.reinoso@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, ALEX FERNANDO CONTERÓN PICUASI declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ALEX FERNANDO CONTERÓN PICUASI

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ALEX FERNANDO CONTERÓN PICUASI, bajo mi supervisión.

DR. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ALEX FERNANDO CONTERÓN PICUASI

DR. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO

DEDICATORIA

A mis padres José Luis y Yolanda por apoyarme y estar pendiente de mí en todo momento y siempre recordarme que se puede lograr cualquier objetivo que uno se propone sin importar lo difícil que sea conseguirlo; a mis hermanos Sisa, Diana, Andy y en general a toda mi familia. En especial a mí, por no rendirme ante las difíciles situaciones que se presentaron.

AGRADECIMIENTO

Agradezco mucho el amor de mis padres José Luis y Yolanda quienes siempre me apoyan, me aconsejan y están pendientes de mí en todo momento. Gracias por sus palabras de motivación que me han ayudado a no rendirme nunca.

A mis hermanos Diana, Andy, en especial a mi hermana Sisa por ser la primera de la familia en viajar y lograr ser una profesional.

A Roberto y mis tías Lucía, Belén, Adela y Marianita por esas palabras de apoyo que me motivan a seguir adelante.

A mis compañeros y amigos, con los que tuve la oportunidad de pasar gratos momentos en mi vida universitaria.

A todos mis profesores que me formaron profesionalmente, pero en especial a aquellos que fueron más allá e hicieron de las clases un ambiente agradable, compartieron sus experiencias y consejos de vida.

Un agradecimiento especial al Dr. Diego Reinoso por permitirme ser guiado en el desarrollo de este trabajo, gracias por su compromiso, paciencia y consideración.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Técnicas de acceso múltiple.....	4
1.4.2 NOMA.....	5
1.4.3 Estimación de canal.....	6
1.4.3.1 Distribución de subportadoras piloto.....	6
1.4.3.2 Técnica de Estimación de Canal	8
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Sistema de transmisión NOMA-OFDM.....	10
2.1.1 Parámetros de configuración para la transmisión.....	11
2.1.2 Parámetros y configuración del modulador OFDM.....	12
2.1.3 Generación de datos.....	13
2.1.4 Codificación FEC	14
2.1.5 Modulación	15
2.1.6 Técnica NOMA	15
2.1.7 Modulación OFDM.....	16
2.2 Canal.....	16
2.2.1 Configuración del canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia.....	17
2.2.2 Aplicación del canal AWGN con desvanecimiento selectivo en frecuencia	18
2.3 Sistema de recepción NOMA-OFDM	19
2.3.1 Sistema de recepción del usuario 1	20
2.3.1.1 Demodulador OFDM	21
2.3.1.2 Estimación del canal y ecualización	21
2.3.1.3 Demodulación	23

2.3.1.4	Decodificación	23
2.3.2	Sistema de recepción del usuario 2	23
2.3.2.1	Cancelación de la señal con mayor potencia.....	24
2.3.2.2	Demodulación de la señal de la capa 2	24
2.3.2.3	Decodificación de la señal de la capa 2.....	25
2.4	Cálculo de errores	25
2.4.1	Cálculo del BER.....	26
2.5	Presentación gráfica del rendimiento del sistema de comunicación	27
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
3.1	Parámetros de simulación.....	30
3.2	Análisis de resultados	31
3.2.1	Influencia del factor de inyección	36
3.2.2	Tasa de codificación en la estimación de canal LS	38
3.3	Conclusiones.....	39
3.4	Recomendaciones.....	40
4	REFERENCIAS	42
5	ANEXOS.....	44
	ANEXO I.....	45

RESUMEN

El presente trabajo trata acerca de la simulación de la estimación del estado de un canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) con desvanecimiento selectivo en frecuencia, en un sistema de comunicación híbrido OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) basado en la técnica de acceso no ortogonal NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*), el cual ofrece un mejor rendimiento del sistema acorde a la creciente demanda de los servicios de comunicaciones inalámbricos. La estimación de canal se realiza mediante la implementación del algoritmo LS (*Least Square*) y la distribución de subportadoras pilotos *block type*.

En el capítulo 1 se presenta la teoría necesaria para el desarrollo del trabajo, en el cual se describen las técnicas de acceso dando un mayor énfasis a la técnica NOMA. Además, se detalla el método de estimación del canal LS y su importancia al momento de recuperar la información en recepción.

El capítulo 2 trata acerca de la codificación del sistema NOMA-OFDM en Matlab el cual está constituido por el transmisor, el canal y los receptores donde se realiza la estimación del canal. También se indican y detallan las funciones y comandos utilizados en la simulación.

En el capítulo 3 se evalúa y compara el rendimiento de la estimación de canal perfecta y estimación de canal LS en el sistema NOMA-OFDM. Los resultados de las simulaciones se presentan mediante curvas de BER vs Eb/No. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado y un posible trabajo futuro.

PALABRAS CLAVE: NOMA, OFDM, canal AWGN, desvanecimiento selectivo en frecuencia, estimación de canal, LS.

ABSTRACT

This project presents the simulation of the state estimation of an AWGN (Additive White Gaussian Noise) channel with frequency selective fading, in an OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) hybrid communication system based on NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), which offers better system performance according to the growing demand for wireless communication services. Channel estimation is performed by implementing the LS (Least Square) algorithm and the block type distribution of pilot subcarriers.

Chapter 1 presents the necessary theory for the development of the work, in which the access techniques are described, giving greater emphasis to the NOMA technique. In addition, the LS channel state estimation method and its importance at the moment of recovering the information in reception are detailed.

Chapter 2 deals with the coding of the NOMA-OFDM system in Matlab which is made up of the transmitter, the channel and the receivers where the channel estimation is performed. The functions and commands used in the simulation are also indicated and detailed.

Chapter 3 evaluates and compares the performance of perfect channel estimation and LS channel estimation in the NOMA-OFDM system. The simulations results are presented by BER vs. E_b/N_0 curves. Finally, the conclusions and recommendations of the work carried out and a possible future work are presented.

KEYWORDS: NOMA, OFDM, AWGN channel, frequency selective fading, channel estimation, LS.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mundo ha presenciado un creciente desarrollo tecnológico en todos los ámbitos, las tecnologías implementadas actualmente en las telecomunicaciones han solventado sin problemas las necesidades de los usuarios. Estos avances tecnológicos significan un aumento en el nivel de procesamiento, acceso y transmisión de señales inalámbricas debido a nuevas aplicaciones que se desarrollan continuamente provocando una mayor demanda de recursos. Las nuevas técnicas de acceso solventan los problemas de asignación eficiente del espectro radioeléctrico, potencia de transmisión, ancho de banda de transmisión, velocidad de transmisión de datos, entre otros; de tal manera que se ofrece mejores características con respecto a las tecnologías predecesoras.

Con el objetivo de compartir recursos entre usuarios en las comunicaciones inalámbricas se han desarrollado varias técnicas de acceso múltiple, entre ellas la que destaca es la técnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). La técnica OFDMA es una técnica de acceso múltiple basada en OFDM, el cual mediante asignaciones de subportadoras ortogonales entre los múltiples usuarios mejora la eficiencia en la transmisión [1].

Para mejorar el problema de los recursos de tal manera que se satisfaga las necesidades de redes de futura generación se han desarrollado nuevas técnicas de acceso múltiple no ortogonales o NOMA como una opción prometedora. Los principales tipos son NOMA en el dominio de la potencia y NOMA en el dominio del código [2]. NOMA en el dominio de la potencia permite el acceso múltiple mediante la asignación de distintos niveles de potencia de transmisión tomando en cuenta las condiciones del canal de los usuarios [3].

La técnica OFDM se combina con el esquema NOMA para conseguir una eficiencia espectral aún más alta, sin embargo, para llevar esto a cabo es necesario realizar la estimación del estado del canal para que el receptor pueda recuperar adecuadamente la información que fue transmitida [4]. En OFDM la estimación del canal se realiza mediante un preámbulo o subportadoras piloto que son secuencias conocidos en transmisión y recepción, donde la distribución de los pilotos puede variar según las condiciones del canal. Tomando en cuenta un entorno en el cual el transmisor y el receptor tienen una posición fija (canal no variante en el tiempo), la distribución de portadoras que se utiliza comúnmente es la de tipo bloque, esta es adecuada para canales selectivos en frecuencia donde se transmiten símbolos OFDM con los pilotos periódicamente [1].

Este trabajo, se enfoca principalmente en la estimación del canal para el sistema de comunicación NOMA OFDM en un entorno vehicular definido por el estándar 802.11p utilizando como método de estimación el algoritmo LS. Para que el canal presente características más realistas, la señal aparte de ser afectada con ruido AWGN propio de los sistemas inalámbricos, sufrirá un desvanecimiento selectivo en frecuencia caracterizado por un canal de Rician.

La estimación realizada en el receptor consigue mejorar en gran medida el rendimiento del sistema de comunicaciones, pues permite compensar la señal recibida que fue afectada por el canal inalámbrico. En el receptor la señal se compensa mediante un ecualizador con el objetivo de que presente mejores características de BER.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular la técnica de acceso NOMA realizando estimación del canal inalámbrico con ayuda de la herramienta Matlab.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir la importancia de la estimación del canal en comunicaciones inalámbricas.
2. Implementar en Matlab la simulación de la estimación de canal mediante el método LS.
3. Analizar los resultados de la simulación variando las tasas de codificación y modulación.

1.3 ALCANCE

En este trabajo se implementará una simulación en Matlab de un sistema NOMA que va a combinar dos flujos de datos, la capa 1 contiene la información del primer usuario y la capa 2 contiene la información del segundo, al final la información llegará a los 2 usuarios. El sistema utilizará un codificador convolucional que podrá generar tasas de $1/2$, $2/3$ y $3/4$. Además, se podrá utilizar modulación QPSK, 16QAM o 64 QAM y el factor de inyección será un parámetro configurable entre 0 y 1 que servirá como un atenuador de la señal de la capa 2. En el canal se tendrá ruido AWGN con desvanecimiento selectivo en frecuencia. Para realizar la estimación del canal se envía un preámbulo o símbolo piloto que permite conocer la afectación que tuvo la información al pasar por el canal, para compensarlo en el receptor mediante la ecualización de la señal recibida. El

receptor del usuario 1 solo decodifica la capa 1 considerando a la capa 2 como ruido, mientras que el otro usuario primero decodifica la capa 1 para luego decodificar la información de la capa 2. Se considera sincronización perfecta en el receptor. La simulación obtendrá como resultado la curva BER (*Bit Error Rate*) vs E_b/N_0 (*Energy per-Bit to Noise Power Spectral Density Ratio*) para cada usuario.

En las pruebas se realizarán simulaciones con dos configuraciones diferentes de tasa de codificación y modulación (las mismas serán seleccionadas en base a los resultados de las simulaciones); además, se probará con 2 factores de inyección. Luego, se analizarán los resultados obtenidos y se obtendrán las conclusiones y recomendaciones.

El desarrollo del trabajo se divide en 3 fases, la primera y más importante es la fase de diseño donde se plantea el diagrama de bloques del sistema de transmisión y recepción NOMA-OFDM, además, se explica de manera general la función de cada bloque. La segunda fase es la de implementación donde el sistema de transmisión y recepción es codificado en base al diagrama de bloques definido en la fase 1, mediante el software de simulación Matlab. La fase final es la de pruebas la cual consiste en comprobar el correcto funcionamiento de la simulación del sistema de comunicaciones NOMA-OFDM, definiendo los valores de los parámetros configurables con los que el sistema presente mejores características. También se realiza un análisis de resultados mediante las gráficas de BER vs E_b/N_0 obtenidas.

1.4 MARCO TEÓRICO

En las últimas décadas las comunicaciones inalámbricas han presenciado un crecimiento y desarrollo considerable, provocando un impacto significativo en la manera en que las personas interactúan entre sí. Las telecomunicaciones ofrecen la posibilidad de transmitir información en tiempo real sin que sea necesario un enlace físico, esto ha convertido a las telecomunicaciones en una necesidad en el diario vivir, por lo cual la demanda de recursos es cada vez mayor como consecuencia del aumento en el número de usuarios.

El buen desempeño de comunicaciones diseñados para mejorar la comunicación entre las personas implica la necesidad de tener mayor eficiencia en la asignación de espectro radioeléctrico, mayor procesamiento y velocidad de transferencia de información [5]. El constante crecimiento en la utilización de las comunicaciones inalámbricas (streaming de audio y video de alta calidad, telefonía móvil, navegación por internet, juegos en línea) ha llevado a la investigación y desarrollo de nuevas soluciones de tecnologías que permitan la utilización eficiente de los recursos mencionados anteriormente, en especial del espectro radioeléctrico [6].

1.4.1 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE

Con el objetivo de mejorar la eficiencia respecto a la utilización de recursos limitados se han desarrollado técnicas de acceso múltiple para los sistemas de transmisión inalámbricos, esto hace posible que un grupo de usuarios puedan compartir recursos de una manera organizada en tiempo, frecuencia o código sin que estos se interfieran entre sí. Entre las técnicas de acceso múltiple se tiene FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) que consiste en la asignación de bandas de frecuencia o canales independientes a cada usuario por lo cual disponen del canal en todos los instantes de tiempo, estos canales están separados por una banda de guarda lo que significa una utilización del espectro reducida. En TDMA (*Time Division Multiple Access*) se hace uso de todo el ancho de banda del canal durante cierto periodo de tiempo y en CDMA (*Code Division Multiple Access*) se emplean códigos para enviar y recibir información de múltiples usuarios [7].

Actualmente, la técnica de acceso múltiple que se ha adoptado en mayor medida para las comunicaciones inalámbricas es OFDMA, el cual es una extensión de OFDM. En la figura 1.1 se observa el esquema de OFDM donde se permite la transmisión de símbolos de un solo usuario en todas las subportadoras, por lo tanto, para conseguir un sistema multiusuario OFDM se combina con la técnica de acceso múltiple FDMA.

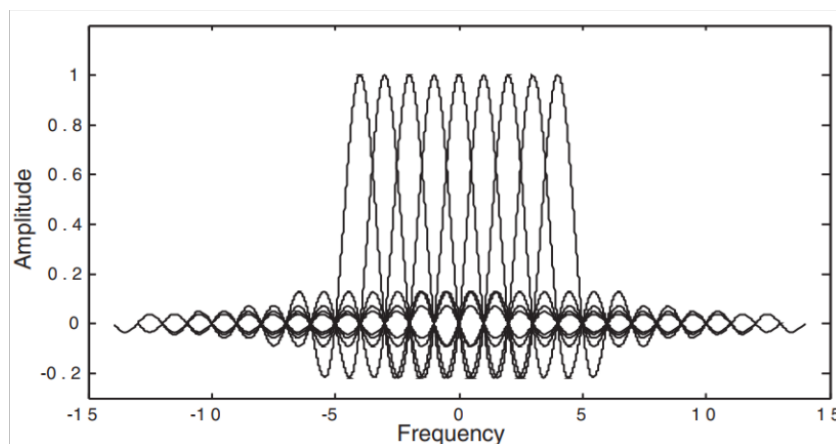


Figura 1.1. Espectro de frecuencia de una señal OFDM [1]

La técnica de acceso múltiple OFDMA se presenta en la figura 1.2. Sin embargo, la creciente demanda de servicios inalámbricos conlleva a buscar alternativas que resuelvan el problema de la limitación de recursos.

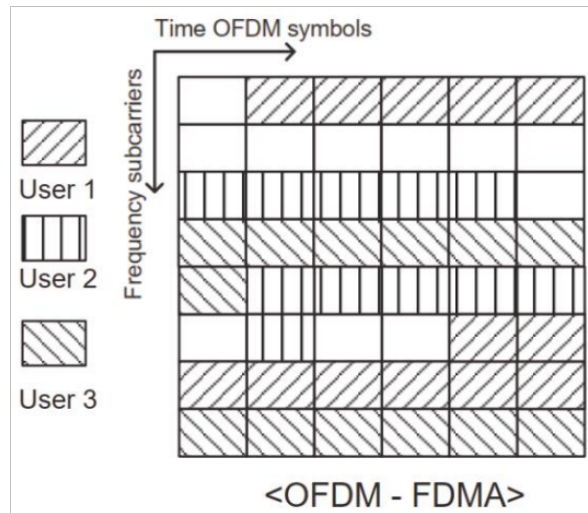


Figura 1.2. Técnica de acceso múltiple OFDMA [1]

1.4.2 NOMA

Para resolver el problema de la limitación del espectro se ha desarrollado una nueva solución efectiva que se trata de un esquema de acceso múltiple no ortogonal o NOMA, de tal manera que satisfaga las necesidades de redes de futura generación. Los enfoques no ortogonales se han desarrollado para la implementación en aplicaciones sensibles a retardos ya que ofrecen una mayor utilización del espectro, lo que significa una ventaja para aplicaciones con requerimientos de alta velocidad de transmisión que envían datos en tiempo real [8].

La técnica NOMA puede dividirse en 2 tipos principales los cuales son NOMA en el dominio del código y NOMA en el dominio de la potencia, en el primero se multiplexa señales de distintos usuarios mediante secuencias de expansión con correlación cruzada no ortogonal [2], en cambio en el segundo tipo se realiza asignaciones de distintos niveles de potencia según sea el caso, el cual dependerá de las condiciones de los canales debido a que múltiples usuarios tendrán acceso a las redes en el mismo instante, por el mismo canal de frecuencia o con el mismo código [3].

En el lado del transmisor, la técnica NOMA asigna diferentes niveles de potencia a dos usuarios mediante un factor de inyección, al primero se lo denomina capa 1 y al segundo capa 2. La información del usuario dos es multiplicado por el factor de inyección de valor menor a 1 por lo que la señal se atenúa.

En el receptor la información de capa 1 es decodificada considerando a la información de la capa 2 como ruido, en cambio la capa 2 es decodificada con la técnica SIC (*Successive Interference Cancellation*). SIC consiste en decodificar primero la

información del usuario de la capa 1 y luego decodificar la información del usuario de la capa 2 eliminando la información del otro usuario [3].

A continuación, en la figura 1.3 se presenta la estructura más simplificada de SIC que se basa en los diferentes niveles de potencia entre los usuarios. Para recuperar la información del usuario con menor potencia primero se decodifica la señal del usuario con mayor potencia para luego decodificar su propia información [9].

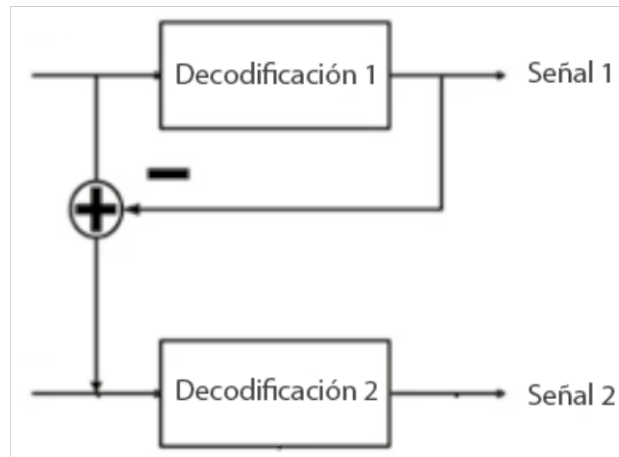


Figura 1.3. Diagrama de bloques del método SIC [9].

1.4.3 ESTIMACIÓN DE CANAL

Debido a la naturaleza impredecible del canal inalámbrico, es necesario realizar la estimación del canal en el receptor para determinar su estado y recuperar adecuadamente la información que fue transmitida mediante el proceso de ecualización. La estimación de canal se realiza mediante un preámbulo (símbolo piloto) que es una secuencia de bits conocida tanto en transmisión como en recepción [1].

El desarrollo del presente trabajo implica un sistema híbrido OFDM basado en NOMA que mejora sustancialmente la eficiencia espectral [4], por lo cual es necesario estudiar cómo se realiza la estimación del canal en OFDM, ya que se procederá de manera similar para la estimación del canal en el sistema NOMA-OFDM. A continuación, se presentan los tipos de distribución de los pilotos y la técnica de estimación que se utilizará.

1.4.3.1 Distribución de subportadoras piloto

Para realizar la estimación de canal, las subportadoras piloto pueden presentar 3 tipos de distribución, estos son: *block type*, *comb type* y *lattice type* [1].

1.4.3.1.1 Block type

En la estimación de canal basada en la distribución de pilotos *block type*, los símbolos de entrenamiento OFDM se envían periódicamente con sus respectivos pilotos en todas las subportadoras [10]. La distribución de los pilotos se presenta en la figura 1.4 [1]. Esta distribución de símbolos piloto es adecuada en canales selectivos en frecuencia por lo cual no habrá error en la estimación de canal [10], por lo tanto, será el tipo de distribución que se manejará para realizar la simulación en Matlab.

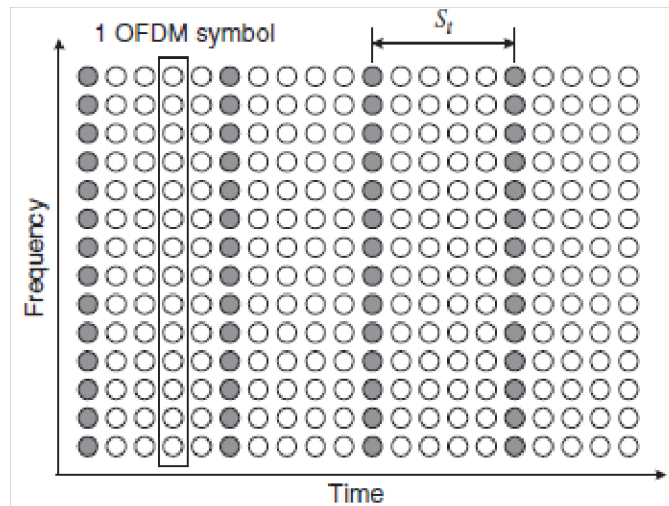


Figura 1.4. Distribución de símbolos pilotos en *Block Type* [1]

1.4.3.1.2 Comb Type

En esta distribución los pilotos se encuentran cada cierto número de subportadoras en todos los símbolos OFDM. Esta distribución es adecuada para canales que presentan desvanecimiento rápido en el tiempo, esto se ilustra en la figura 1.5 [1].

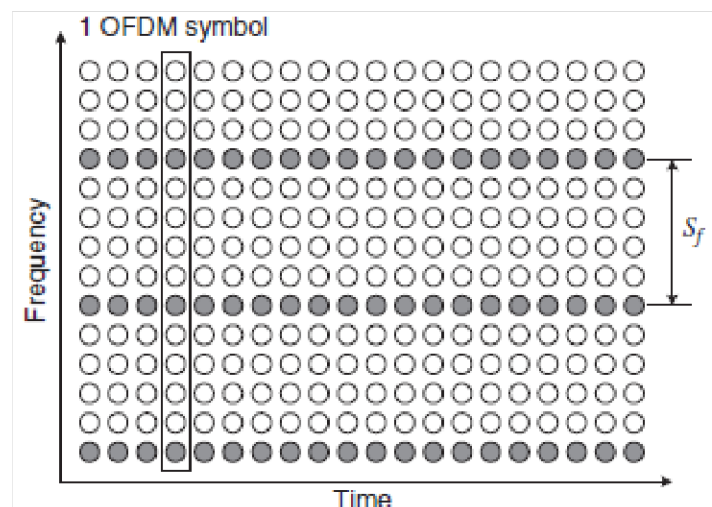


Figura 1.5. Distribución de pilotos *Comb Type* [1]

1.4.3.1.3 Lattice type

Los pilotos se distribuyen en tiempo y frecuencia de acuerdo a periodos ya establecidos y puede ser usada para estimar un canal variable en el tiempo y selectivo en frecuencia. Esta distribución se representa en la figura 1.6 [1].

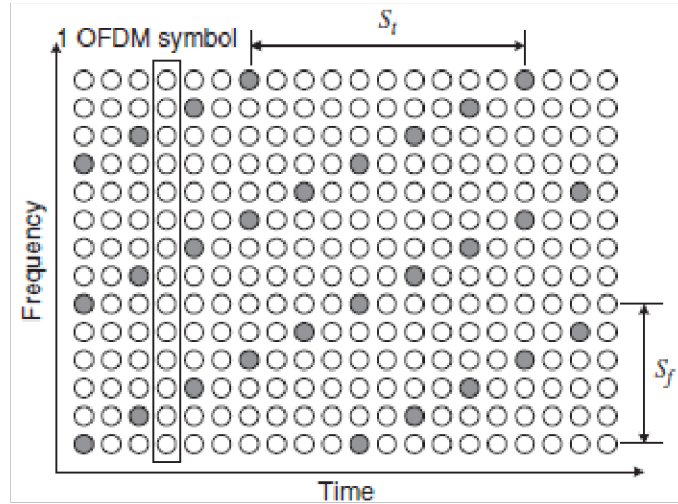


Figura 1.6. Distribución de pilotos *Lattice Type* [1]

1.4.3.2 Técnica de Estimación de Canal

La estimación de canal se realiza mediante símbolos de entrenamiento o pilotos que son secuencias conocidas por el transmisor y por el receptor; para esto se tienen dos métodos de estimación los cuales son el LS (*Least-Square*) y el MMSE (*Minimum-Mean-Square-Error*) [1]. El estimador LS es de baja complejidad, pero su rendimiento no es tan bueno respecto al estimador MMSE, en cambio el estimador MMSE ofrece un buen rendimiento, pero su implementación tiene un alto grado de complejidad [11], por lo que en este trabajo se analizará únicamente el primer método debido al alcance presentado anteriormente.

1.4.3.2.1 Estimación de canal LS

La señal de entrenamiento recibida afectada por el canal inalámbrico es denotada por Y , X es una matriz diagonal que contiene la secuencia conocida por el transmisor y por el receptor (asumiendo ortogonalidad), H es un vector que representa las condiciones aleatorias del canal y Z es un vector de ruido blanco de media cero, tal y como se presenta en la ecuación 1.1 y 1.2 [1, 12].

$$Y \triangleq \begin{bmatrix} Y[0] \\ Y[1] \\ \vdots \\ Y[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X[0] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & X[1] & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & X[N-1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H[0] \\ H[1] \\ \vdots \\ H[N-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z[0] \\ Z[1] \\ \vdots \\ Z[N-1] \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$Y = XH + Z \quad (1.2)$$

La estimación de canal usando el método LS se realiza en base a la ecuación 1.3.

$$H_{LS} = \frac{Y}{X} \quad (1.3)$$

La ecuación 1.4 permite la estimación del canal mediante el método LS para cada subportadora [1, 12].

$$H_{LS}[k] = \frac{Y[k]}{X[k]}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (1.4)$$

Una vez que se conoce H_{LS} , los datos del usuario se recuperan mediante el proceso de ecualización, el cual compensa los efectos que sufrió la señal al viajar por el canal. La ecualización consiste en dividir la señal recibida $Y[k]$ para los valores del canal estimado $H_{LS}[k]$, la ecuación 1.5 representa la señal recibida después de la ecualización.

$$X_{EC}[k] = \frac{Y[k]}{H_{LS}[k]}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (1.5)$$

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se explica el desarrollo de un Sistema de comunicación inalámbrico caracterizado por tener un acceso múltiple no ortogonal. El sistema NOMA - OFDM ha sido implementado en el entorno de simulación de Matlab y consta de tres partes principales. La primera parte corresponde al transmisor NOMA - OFDM, en la segunda parte se define el canal caracterizado por un desvanecimiento selectivo en frecuencia con ruido AWGN y la tercera parte corresponde al receptor NOMA - OFDM. El mayor enfoque de estudio se realiza en el receptor donde se implementa el estimador LS con el objetivo de primero estimar el estado del canal y luego, compensar los efectos del canal sobre la información de los usuarios.

Para el desarrollo del presente trabajo es necesario definir el enfoque y alcance para su adecuada realización.

El enfoque que se emplea es de carácter cuantitativo debido a que los resultados son cuantificados mediante parámetros como son el BER y el Eb/No. El tipo de alcance que se maneja en mayor medida es el descriptivo ya que se presenta una revisión de la teoría sobre NOMA - OFDM y las técnicas de estimación de canal. El trabajo también tiene un alcance correlacional ya que se define la relación entre los parámetros de transmisión de datos como son la tasa de codificación, tipos de modulación, valor del factor de inyección, entre otros, y su afectación a valores de BER y Eb/No en el receptor. Por último, el trabajo abarca un alcance explicativo ya que se analizan las causas del cambio de los valores de BER cuando se tiene una comunicación con estimación de canal perfecta y estimación de canal LS [13].

A continuación, se explica detalladamente el funcionamiento del programa principal conformado por el transmisor, canal de comunicación, receptor y de las funciones que son utilizadas por el programa principal. La codificación del programa se ha realizado tomando en cuenta el estándar 802.11p, es decir, la asignación de valores de algunos parámetros específicos se basa en este estándar.

2.1 SISTEMA DE TRANSMISIÓN NOMA - OFDM

Para la simulación de un sistema de transmisión NOMA - OFDM se definen dos usuarios independientes a los cuales se les asigna información aleatoria. La información de los usuarios es codificada mediante un codificador FEC (*Forward Error Correction*) para luego ser modulada.

Para la aplicación de la técnica NOMA se define un factor de inyección menor a 1 que multiplica a los datos del usuario 2, esta señal atenuada se suma con los datos del usuario 1. A la señal que resulta de la suma de los datos de los dos usuarios se le añade un preámbulo definido por el estándar 802.11p con una distribución de pilotos *Block Type*.

Luego se aplica el objeto modulador OFDM previamente configurado, donde se especifica los parámetros necesarios para generar los símbolos OFDM y finalmente se transmite los datos por el canal inalámbrico. El diagrama de bloques del sistema de transmisión NOMA - OFDM se presenta en la figura 2.1.

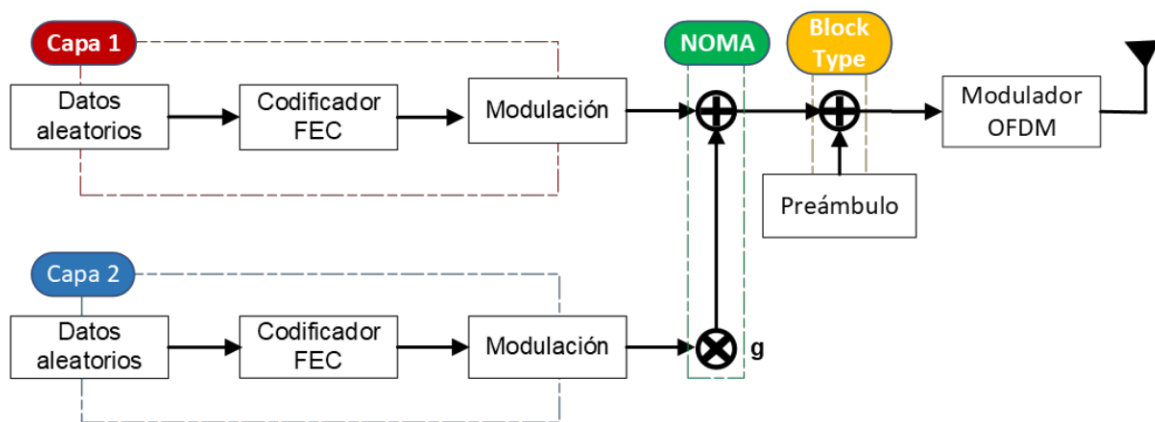


Figura 2.1. Diagrama de bloques del transmisor NOMA - OFDM

2.1.1 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN

Para la ejecución del programa es necesario establecer ciertos parámetros para que sea posible la transmisión mediante la técnica NOMA - OFDM, de ahora en adelante se referirá a la información del primer usuario como capa 1 y la información del segundo usuario como capa 2. Los parámetros configurados para la capa 1 son establecidos independientemente a la configuración de la capa 2, y viceversa. La configuración de las capas se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de configuración para la transmisión NOMA - OFDM

Usuario	Detalle	Variable
Capa 1	Tasas de codificación	k1
	Técnica de modulación	M1
Capa 2	Tasas de codificación	k2
	Técnica de modulación	M2
	Factor de inyección (g)	g_dB

A continuación, se presentan las posibles configuraciones de los parámetros mencionados antes, donde:

- **k**: Es la tasa de codificación que puede tomar valores de 1/2, 2/3 y 3/4.
- **M**: Representa el número de fases de la modulación en QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). En 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y 64 QAM representa el número de puntos en el diagrama de constelación. M se representa por la ecuación 2.1, donde n es el número de bits agrupados en cada estado de modulación y está dado por la ecuación 2.2.

$$M = 2^n \quad (2.1)$$

$$n = \log_2 M \quad (2.2)$$

- **g**: Es el factor de inyección que atenúa a la señal de la capa 2. Sus posibles valores adimensionales se representan mediante la ecuación 2.3, y su valor en dBs se representa por la ecuación 2.4.

$$0 < g < 1 \quad (2.3)$$

$$g [dB] = 10 \cdot \log(g) \quad (2.4)$$

2.1.2 PARÁMETROS Y CONFIGURACIÓN DEL MODULADOR OFDM

La modulación OFDM se realiza mediante la configuración del objeto `comm.OFDMModulator`, de esta manera se realiza la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), inserción de las subportadoras pilotos, subportadoras Null y DC, inserción del prefijo cíclico y generación de los símbolos OFDM. Los valores asignados a estos parámetros se muestran en la tabla 2.2. También se configura el objeto `comm.OFDMDemodulator` como proceso contrario al modulador OFDM.

Tabla 2.2. Parámetros de configuración del Modulador OFDM

Detalle	Parámetro	Valor
OFDM Modulador	Tamaño de la IFFT	64
	Núm. de subportadoras de datos	48
	Núm. de subportadoras piloto	4
	Tamaño del prefijo cíclico	16
	Núm. de símbolos OFDM/paquete	5

La configuración del objeto `comm.OFDMModulator` se guarda en la variable `OFDM_mod` y la configuración del objeto `comm.OFDMDemodulator` se guarda en la variable

OFDM_demod. El segmento de código 2.1 muestra la configuración del modulador y demodulador OFDM.

```

21 %% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL MODULADOR OFDM
22 - n_sym=5; % Número de símbolos OFDM por paquete
23 - Nfft=64; % Tamaño fft
24 - data_sub=48; % Número subportadoras de datos
25 - pilot_sub=4; % Número subportadoras piloto
26 % Preámbulo - Estándar 802.11p
27
28 %% MODULADOR OFDM - Añade Pilotos, Añade PC, Forma simb. OFDM, Realiza IFFT
29 - OFDM_mod = comm.OFDMModulator('FFTLength',64, ...
30 % 'PilotInputPort',true, ...
31 % 'PilotCarrierIndices',[12; 26; 40; 54], ...
32 % 'InsertDCNull',true, ...
33 % 'CyclicPrefixLength',16, ... % PC de 1/4
34 % 'NumSymbols',n_sym+1);
35
36 %% DEMODULADOR OFDM - Proceso contrario a MODULADOR OFDM
37 - OFDM_demod = comm.OFDMDemodulator(OFDM_mod);
38

```

Segmento de código 2.1. Configuración del Modulador OFDM

2.1.3 GENERACIÓN DE DATOS

El sistema de transmisión NOMA - OFDM transmite la información de dos usuarios. La cantidad de datos de ambos usuarios se generan de manera aleatoria mediante el comando *randi*, y dependen de la tasa de codificación y del tipo de modulación seleccionado para cada capa. Los datos de los usuarios son almacenados en las variables *datos_c1* y *datos_c2*. El segmento de código 2.2, 2.3 y 2.4 muestran la codificación para la generación de datos.

```

49 %% GENERACIÓN DEL # DE BITS PARA CADA CAPA
50 - info_usuario_1=48*k1*n1*n_sym; % # bits - capa 1
51 - info_usuario_2=48*k2*n2*n_sym; % # bits - capa 2
52

```

Segmento de código 2.2. Cantidad de bits de la capa 1 y capa 2

```

63 %% CAPA 1 - USUARIO 1
64 - datos_c1 = randi([0 1],info_usuario_1,1); % Generación bits C1

```

Segmento de código 2.3. Generación de datos para la capa 1

```

71 %% CAPA 2 - USUARIO 2
72 - datos_c2 = randi([0 1],info_usuario_2,1); % Generación bits C2

```

Segmento de código 2.4. Generación de datos para la capa 2

2.1.4 CODIFICACIÓN FEC

El proceso de codificación FEC que consiste en añadir bits de redundancia a los bits de los datos de la capa 1 y capa 2 se indica en el segmento de código 2.5 y 2.6 respectivamente. Las funciones *conf_cod1()* y *conf_cod2()* realizan la configuración del codificador y decodificador de cada capa, teniendo como argumentos de entrada la tasa de codificación y el *traceBack*. El *traceBack* es un parámetro del codificador FEC que está definido en la línea 43 del programa principal (Anexo I).

```
65 - [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack);
66 - datos_cod1 = convEncoder1(datos_c1);
```

Segmento de código 2.5. Codificación FEC - capa 1

```
73 - [convEncoder2,vitDecoder2]=conf_cod2(k2,traceBack);
74 - datos_cod2 = convEncoder2(datos_c2);
```

Segmento de código 2.6. Codificación FEC - capa 2

```
1  function [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(codeRate1,traceBack)
2
3  -   trellis = poly2trellis(7,[171 133]); % Codificador convolucional
4
5  % Configuración codificador - capa 1
6  -   convEncoder1 = comm.ConvolutionalEncoder('TrellisStructure',trellis);
7  -   vitDecoder1 = comm.ViterbiDecoder('TrellisStructure',trellis, ...
8  -   'InputFormat','Hard','TracebackDepth',traceBack);
9
10 -   if codeRate1==3/4
11 -       convEncoder1.PuncturePatternSource = 'Property';
12 -       convEncoder1.PuncturePattern = [1;1;0;1;1;0];
13 -       vitDecoder1.PuncturePatternSource = 'Property';
14 -       vitDecoder1.PuncturePattern = convEncoder1.PuncturePattern;
15
16 -   elseif codeRate1==2/3
17 -       convEncoder1.PuncturePatternSource = 'Property';
18 -       convEncoder1.PuncturePattern = [1;1;0;1];
19 -       vitDecoder1.PuncturePatternSource = 'Property';
20 -       vitDecoder1.PuncturePattern = convEncoder1.PuncturePattern;
21 -   end
22
23 - end
```

Segmento de código 2.7. Función utilizada en la codificación FEC - capa 1

La función *conf_cod1()* utilizada para la configuración del codificador y decodificador de los datos de la capa 1 se presenta en el segmento de código 2.7. En la línea 3 del segmento de código 2.7 se especifica la estructura de trellis que define un codificador convolucional. Los parámetros de salida de esta función corresponden a la configuración del codificador con tasas de 1/2, 2/3 y 3/4 y del decodificador. En las líneas de código 66

y 74 del segmento de código 2.5 y 2.6 se codifican los datos de cada capa y se guardan en las variables *datos_cod1* y *datos_cod2*.

2.1.5 MODULACIÓN

El tipo de modulación que se realiza en cada capa está dado por los valores de *M1* y *M2*, estos pueden tomar valores de 4, 16 y 64 para definir una modulación QPSK, 16QAM o 64QAM. Para realizar la modulación se utiliza la función *qammod* del *Communications Toolbox*, el cual para la capa 1 recibe como argumentos de entrada el vector de datos *datos_cod1* y el valor de *M1*. El par de argumentos '*InputType*', '*bit*' especifica que los valores de la señal de entrada deben ser de tipo binario y el número de filas del vector de datos debe ser múltiplo de *n* (ecuación 2.2) y el par de argumentos '*UnitAveragePower*', *true* normaliza los datos de salida para una potencia promedio de 1. Los datos modulados se almacenan en la variable *datos_mod1* y se reorganiza en la matriz *datos_capa1* de dimensiones *data_sub* x *n_sym*, donde *data_sub* es el número de subportadoras de datos y *n_sym* es el número de símbolos OFDM por paquete. El mismo proceso se realiza para la modulación de los datos de la capa 2. En los segmentos de código 2.8 y 2.9 se presenta la codificación necesaria para realizar la modulación de los datos.

```
68 - datos_mod1 = qammod(datos_cod1,M1,'InputType','bit','UnitAveragePower',true)
69 - datos_capa1=reshape(datos_mod1,data_sub,n_sym);      % Convierte en matriz
```

Segmento de código 2.8. Modulación - capa 1

```
75 - datos_mod2 = qammod(datos_cod2,M2,'InputType','bit','UnitAveragePower',true)
76 - datos_capa2=reshape(datos_mod2,data_sub,n_sym);      % Convierte en matriz
```

Segmento de código 2.9. Modulación - capa 2

2.1.6 TÉCNICA NOMA

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 2.1, el siguiente proceso para la transmisión es la implementación de la técnica NOMA la cual consiste en reducir la potencia de transmisión de los datos de la capa 2 mediante un factor de inyección *g* para luego ser sumada con los datos de la capa 1, dando como resultado una señal resultante que se guarda en la matriz *datos_total*. La codificación que permite la aplicación de la técnica NOMA se presenta en el segmento de código 2.10.

```
79 - datos_total = datos_capa1+datos_capa2*g;          % SEÑAL RESULTANTE
```

Segmento de código 2.10. Aplicación de la técnica NOMA

2.1.7 MODULACIÓN OFDM

La modulación OFDM es el último paso para la transmisión NOMA - OFDM, sin embargo, para realizar la estimación de canal LS en el receptor es necesario definir una secuencia de bits cuyos valores están dados por el estándar 802.11p. En la sección 1.4.2.1 del capítulo 1 se mencionó que la distribución de pilotos más apropiada para un canal selectivo en frecuencia es la del tipo bloque donde el preámbulo se repite al inicio de cada trama. Por lo tanto, a la matriz *datos_total* se antepone el preámbulo definido en el segmento de código 2.11.

```
53 %% Preámbulo y Pilotos- Estándar 802.11p
54 - preambulo = [1,1,1,1,-1,-1,-1,1, -1,-1,-1,-1, 1,1,-1,1, -1,-1,1,1,...
55 -1,1,1,-1, 1,1,1,1, 1,1,-1,1,1,1,-1,1, 1,-1,-1,1, 1,1,-1,1, -1,-1,-1,1];
```

Segmento de código 2.11. Preámbulo

La modulación OFDM se realiza en la línea de código 81 del segmento de código 2.13 mediante el comando *step*, el cual ejecuta el objeto *OFDM_mod* que contiene la configuración del objeto *comm.OFDMModulator* realizado en el segmento de código 2.1 de la sección 2.1.2. El segundo argumento de entrada es la matriz resultante de la suma de los datos de la capa 1 y 2 denotado por *datos_total*, mientras que el tercer argumento *pilotos* contiene los valores de los pilotos y está definido en el segmento de código 2.12. El argumento de salida *senal_tx* es la señal que será transmitida por el canal inalámbrico.

```
56 - pilotos=repmat([1;-1;1;-1],1,n_sym+1);
```

Segmento de código 2.12. Pilotos

```
80 - datos_total = [preambulo',datos_total]; %% Adición del preámbulo - BT
81 - senal_tx = step(OFDM_mod,datos_total,pilotos); %% Modulación OFDM
```

Segmento de código 2.13. Distribución de pilotos *Block Type* y modulación OFDM

2.2 CANAL

La señal emitida por el transmisor NOMA - OFDM es afectada por el canal AWGN con desvanecimiento selectivo en frecuencia. El ruido AWGN es propio de los sistemas de comunicación inalámbricos por lo que no se puede evitar su efecto.

Para realizar la codificación del canal se parte del hecho de que los datos del usuario 1 y los datos del usuario 2 son afectados en diferente medida por los canales inalámbricos, debido a las condiciones externas de los usuarios. El diagrama de bloques de la figura 2.2 muestra el esquema considerado para la implementación del canal inalámbrico.

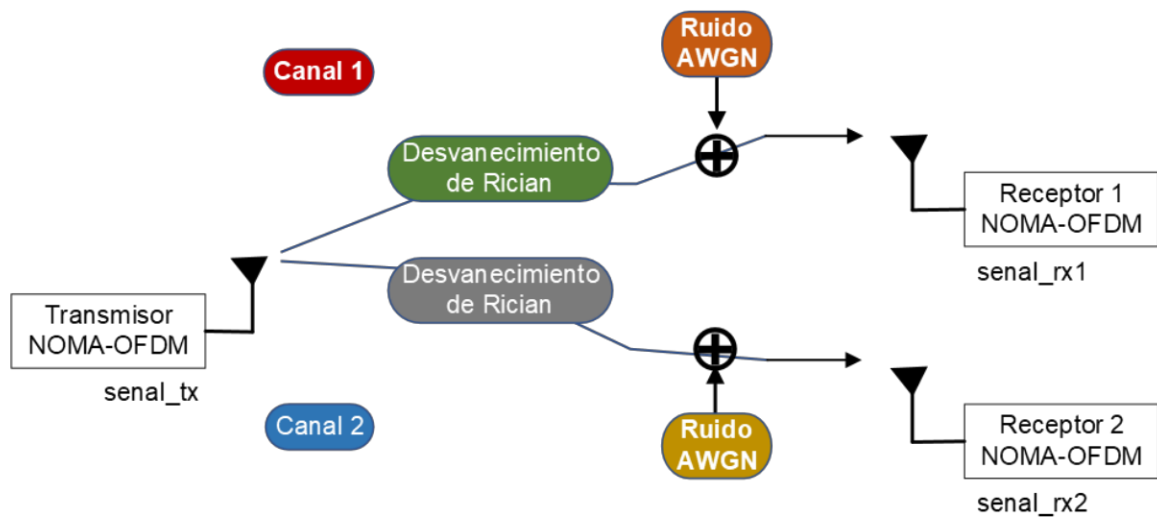


Figura 2.2. Diagrama de bloques del canal inalámbrico

2.2.1 CONFIGURACIÓN DEL CANAL CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA

El canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia se define mediante la función *channel()* en el segmento de código 2.14, donde se configuran los parámetros necesarios del objeto `comm.RicianChannel`.

```

1  function [ canal_fading,sampIdx ] = Channel( )
2
3  % Configuración de parámetros para un canal con desvanecimiento de Rician
4
5  %Urban-LOS
6  Pot = [0 -8 -10 -15];           % Potencia en dB de cada rayo
7  Delay = [0 100 200 300]*1e-9;  % Delay Retardo de cada rayo
8  K=10;                          % Parámetro para Rayleigh
9
10 % Establecer la frecuencia Doppler máxima
11 fd = 0;                        % Canal no variante en el tiempo
12 % Definición de la frecuencia de muestreo según el AB del estándar
13 sRate = 10*1e6; % Estándar 802.11p
14 % Creación el canal
15 canal_fading = comm.RicianChannel (...
16     'KFactor',           K, ...
17     'SampleRate',       sRate, ...
18     'PathDelays',       Delay, ...
19     'AveragePathGains', Pot, ...
20     'MaximumDopplerShift', fd, ...
21     'PathGainsOutputPort', true ...
22 );
23
24 % Cálculo sampIdx (vector con retardos normalizados respecto a la fs)
25 sampIdx = round(Delay/(1/sRate)) + 1;
26 end

```

Segmento de código 2.14. Función que define el canal con desvanecimiento de Rician

En el segmento de código 2.15 se muestran los argumentos de salida de la función *channel()* los cuales son el objeto *canal_fading* que contiene la configuración del canal de Rician y *sampIdx* que contiene los retardos normalizados con respecto a la frecuencia de muestreo dado por el estándar 802.11p.

```

39 %% CONFIGURACIÓN DEL CANAL CON DESVANECIMIENTO DE RICIAN
40 - [canal_fading,sampIdx]=Channel(); % Genera canal con desvanecimiento

```

Segmento de código 2.15. Llamado de la función *channel*

2.2.2 APLICACIÓN DEL CANAL AWGN CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA

Como la afectación del canal inalámbrico debe ser diferente para cada usuario en cada iteración de la simulación es necesario resetear el canal. Para que la señal sea afectada por el canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia se utiliza el comando *step*, cuyos argumentos de entrada son el objeto *canal_fading* con la configuración del canal de Rician y *senal_tx* que es la señal transmitida en el dominio del tiempo. Los argumentos de salida para el caso del canal del usuario 1 son *y1* que es la señal afectada por el canal y *pathgains1* que representa la respuesta del canal en el dominio del tiempo. La adición del ruido AWGN a la señal *y1* se realiza mediante el comando *awgn*, donde se tiene como argumentos de entrada a SNR en dB y '*measured*'. La codificación de la aplicación del canal AWGN con desvanecimiento selectivo en frecuencia se presenta en el segmento de código 2.16.

```

83 %% CANAL CON DESVANECIMIENTO DE RICIAN
84 % Canal de la señal del usuario 1
85 - reset(canal_fading); % Resetear el objeto canal
86 - [y1,pathgains1] = step(canal_fading,senal_tx); % Filtrar la señal con canal
87 % Canal de la señal del usuario 2
88 - reset(canal_fading); % Resetear el objeto canal
89 - [y2,pathgains2] = step(canal_fading,senal_tx); % Filtrar la señal con canal
90
91 %% CANAL CON RUIDO AWGN
92 % Canal de la señal del usuario 1
93 - senal_rx1=awgn(y1,SNR_dB(i),'measured'); % Se aplica ruido
94 % Canal de la señal del usuario 2
95 - senal_rx2=awgn(y2,SNR_dB(i),'measured'); % Se aplica ruido
96

```

Segmento de código 2.16. Aplicación del canal

2.3 SISTEMA DE RECEPCIÓN NOMA-OFDM

El diagrama de bloques del sistema de recepción NOMA-OFDM con estimación del estado del canal LS se presenta en la figura 2.3. Además, se ha realizado la codificación del sistema de recepción NOMA-OFDM con estimación de canal perfecta para poder comparar los resultados con la estimación LS en el siguiente capítulo, por lo tanto, el diagrama de bloques del sistema de recepción donde es conocido el estado del canal se presenta en la figura 2.4.

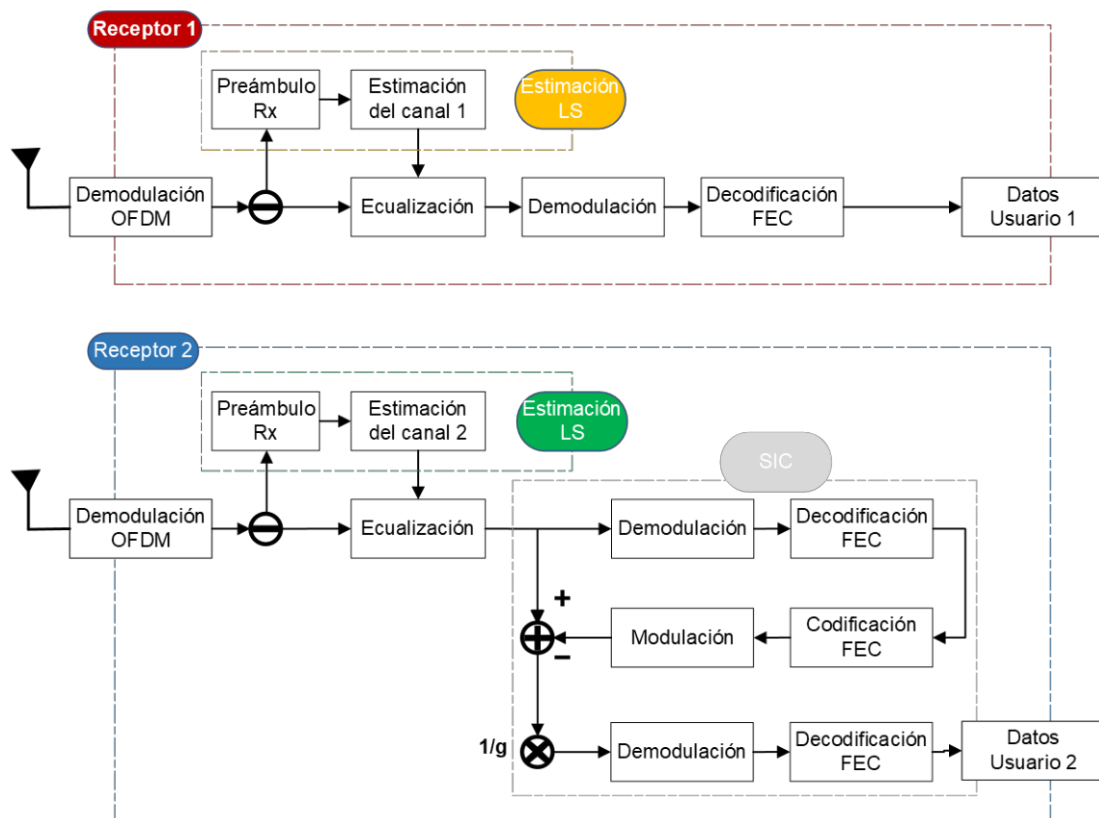


Figura 2.3. Receptor NOMA - OFDM con estimación de canal LS

La señal que llega al receptor del usuario 1 es denotada por $senal_{rx1}$ y la señal que llega al receptor del usuario 2 es llamada $senal_{rx2}$. Estas señales, aunque transporten la misma información no son afectadas en igual medida por el canal, tal y como sucede en la realidad.

El proceso que se lleva a cabo en el sistema de recepción 1 para recuperar los datos de la capa 1 es inverso al que se realiza en el transmisor, es decir, se realizan los procesos de demodulación OFDM, de estimación de canal (si es que es al caso), de ecuación, de demodulación y por último de decodificación de los datos considerando la información de la capa 2 como ruido. El sistema de recepción 2 es más complejo con respecto al

receptor 1, esto se debe a que además de realizar los procesos mencionados anteriormente se realiza un proceso adicional llamado SIC que permite recuperar la información del usuario con menor potencia.

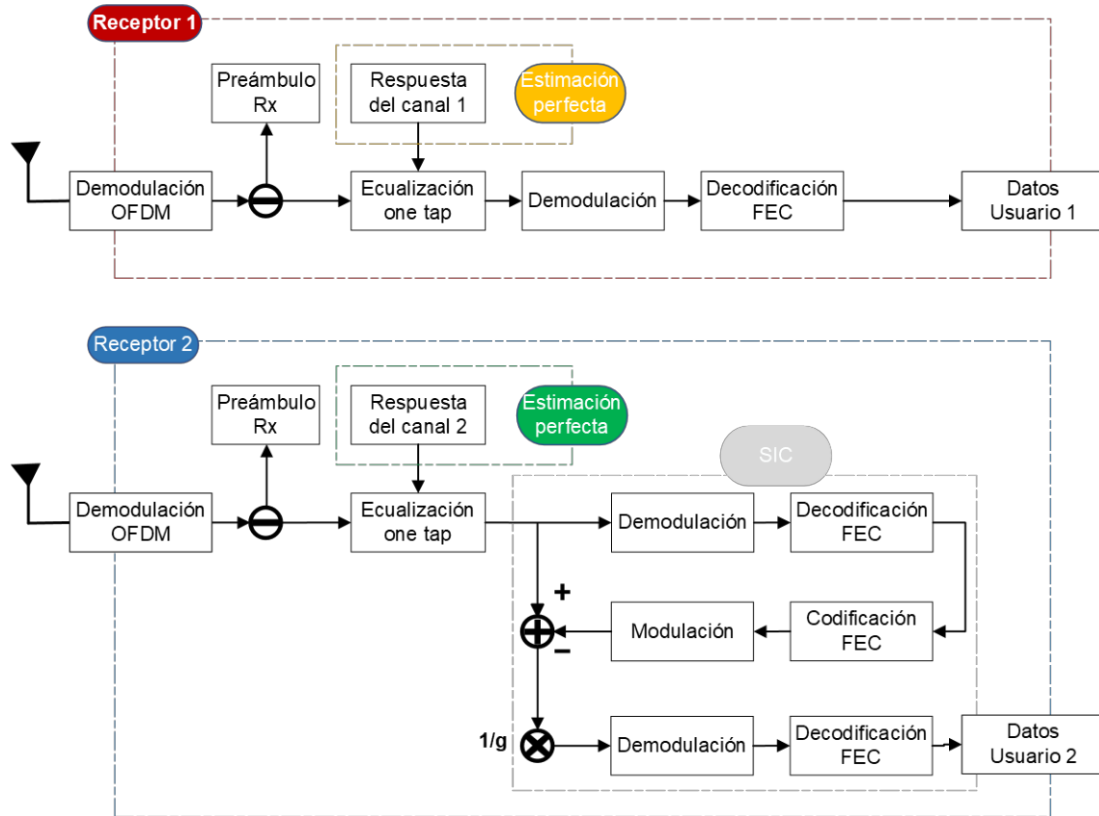


Figura 2.4. Receptor NOMA - OFDM con estimación de canal perfecta

2.3.1 SISTEMA DE RECEPCIÓN DEL USUARIO 1

Como se mencionó anteriormente, el sistema de recepción del usuario 1 es simple, ya que para recuperar los datos de la capa 1 se considera a los datos decodificados de la capa 2 como ruido. El diagrama de bloques del receptor 1 se presenta en la figura 2.5.

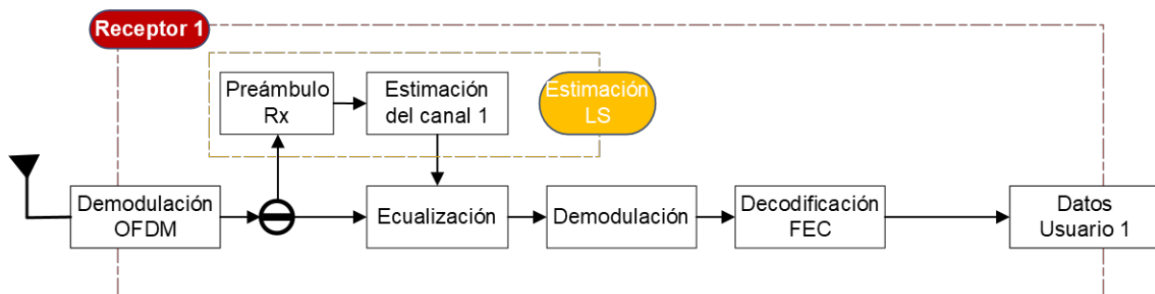


Figura 2.5. Receptor 1 con estimación de canal LS

2.3.1.1 Demodulador OFDM

La demodulación de la señal *datos_rx1* se realiza mediante el objeto *OFDM_demod* que fue configurada en el segmento de código 2.1 en base a los parámetros de configuración del objeto *OFDM_mod*. Como se observa en el segmento de código 2.17, el comando *step* realiza la demodulación OFDM y lo almacena en la variable *datos_rx1*.

```
97 %% RECEPTOR - USUARIO 1
98 - datos_rx1= step(OFDM_demod,senal_rx1);           % Demodulador OFDM
```

Segmento de código 2.17. Demodulación OFDM de los datos del usuario 1

2.3.1.2 Estimación del canal y ecualización

En el programa principal se realiza la estimación del canal perfecta y la estimación del canal LS. La estimación del canal perfecta se realiza como se indica en la figura 2.4, donde se conoce la respuesta del canal en el dominio del tiempo almacenado en la variable *pathgains* y los retardos normalizados con respecto a la frecuencia de muestreo definida por el estándar 802.11p contenidos en la variable *sampIdx*.

En la estimación de canal LS, no se conoce la respuesta del canal por lo cual se realiza la estimación mediante el preámbulo recibido en la señal *datos_rx1* y el preámbulo conocido por el receptor. En el segmento de código 2.18 se presenta la codificación para la estimación del canal.

```
100 - if k==1
101     % ESTIMACIÓN PERFECTA - ECUALIZACIÓN ONE TAP
102     rx_datos_ecl=one_tap(datos_rx1,n_sym,pathgains1,sampIdx);
103 - elseif k==2
104     % ESTIMACION LS - ECUALIZACIÓN
105     rx_datos_ecl=estimacion_ls(datos_rx1,n_sym,preambulo);
106 - end
```

Segmento de código 2.18. Estimación del canal y ecualización

La función que realiza la estimación de canal perfecta y la ecualización one tap es *one_tap()* y tiene como entradas la señal demodulada *datos_rx*, el número de símbolos OFDM, la matriz *pathgains* y el vector *sampIdx*. La función *one_tap()* se muestra en el segmento de código 2.19.

```

1  function data_eq=one_tap(datos_rx,n_sym,pathgains,sampIdx)
2
3  -   H=zeros(64,n_sym);           % Inicialización de la variable H
4
5  -   for i=2:n_sym+1
6  -       temp=pathgains((i-1)*80+17,:); % pathgains: representa la resp.
7  -       temp2=zeros(1,64);         % del canal en el dominio del T
8  -       temp2(sampIdx)=temp;
9  -       H(:,i-1)=fft(temp2);       % Se genera la respuesta de F de
10 -      end                         % cada simbolo OFDM transmitido
11
12      % Reorganización del orden por como se forman los símbolos OFDM en el TX
13 -     H_eq=[H(39:43,:);H(45:57,:);H(59:64,:);H(2:7,:);H(9:21,:);H(23:27,:)];
14 -     datos_rx=datos_rx(:,2:end);  % Eliminación del preámbulo
15 -     rx_data_eq=datos_rx./H_eq;   % ECUALIZACIÓN one-tap
16 -     data_eq=reshape(rx_data_eq,48*n_sym,1); % Reorganiza los datos

```

Segmento de código 2.19. Función *one_tap*

La función *estimación_ls()* realiza la estimación de canal LS, para esto se envía como entrada los *datos_rx*, el número de símbolos y el preámbulo que es conocido por el transmisor y el receptor. La ecuación 1.4 utilizada en la línea 5 del segmento de código 2.20 permite realizar una división elemento a elemento para todos los valores de k para determinar el estado del canal, donde *preambulo_r* es la secuencia de entrenamiento recibida que fue afectada por el canal (Y), la variable *preambulo* representa la secuencia conocida (X) y H_{ls} es el vector que almacena el estado del canal (H_{LS}). Asumiendo que la respuesta del canal es la misma para todos los símbolos de datos que se transmite en cada bloque, se repite el vector de estado de canal varias veces según n_{sym} para que sea posible la estimación de canal. Esto se observa en la línea 6 de la función *estimación_ls()*. El cálculo se realiza mediante la ecuación 1.5 donde X_{Ec} es la señal ecualizada que se guarda en la variable *data_eq*, Y es la señal recibida denotada por *datos_rx* y H_{LS} representa el estado del canal. Este proceso se realiza en la línea 9 del segmento de código 2.20.

```

1  function data_eq=estimacion_ls(datos_rx,n_sym,preambulo)
2
3  -   preambulo_r=datos_rx(:,1);     % Recupero el preámbulo de la señal
4  -   datos_rx=datos_rx(:,2:end);   % Elimino el preámbulo
5  -   H_ls=preambulo_r'./preambulo; % Vector del estado del canal
6  -   H_ls=repmat(H_ls,1,n_sym);    % ESTIMACIÓN DEL CANAL
7
8  -   datos_rx=reshape(datos_rx,48*n_sym,1);
9  -   data_eq=datos_rx./ H_ls';     % Ecualización - compensa los efectos
10 -                                % del canal

```

Segmento de código 2.20. Función *estimación_ls*

2.3.1.3 Demodulación

La demodulación de los datos del usuario 1 se realiza mediante la función *qamdemod* del *Communications Toolbox*, el cual realiza el proceso opuesto a la función *qammod*. Los parámetros de entrada de esta función se explicaron en la sección 2.1.5.

```
108 - datos_user1_dem = qamdemod(rx_datos_ec1,M1,'OutputType','bit',...
109     'UnitAveragePower',true); % Demodulación
```

Segmento de código 2.21. Demodulación de datos del usuario 1

2.3.1.4 Decodificación

La decodificación FEC de los datos del usuario 1 se realiza mediante la configuración del objeto *vitDecoder1* realizado previamente en el segmento de código 2.5. La información del usuario 1 se guarda en la variable *info_user1* como se indica en el segmento de código 2.22.

```
111 - info_user1 = vitDecoder1(datos_user1_dem); % Decodif. FEC
```

Segmento de código 2.22. Demodulación de datos del usuario 1

2.3.2 SISTEMA DE RECEPCIÓN DEL USUARIO 2

El sistema de recepción del usuario 2 es más complejo que el receptor 1 debido a que se debe recuperar la señal de menor potencia. El proceso de demodulación OFDM, estimación de canal perfecta o LS, ecualización, demodulación y decodificación es similar a lo explicado en la sección 2.3.1 y se muestra en el segmento de código 2.23. El proceso adicional que se debe realizar se basa en la cancelación de interferencia sucesiva o SIC por sus siglas en inglés. Este proceso se indica en la figura 2.6.

```
117 %% RECEPTOR - USUARIO 2
118 - datos_rx2= step(OFDM_demod,senal_rx2); % Proceso inverso OFDM
119
120 - if k==1
121     % ESTIMACIÓN DE CANAL - ECUALIZACIÓN DE LA SEÑAL RESULTANTE
122     rx_datos_ec2=one_tap(datos_rx2,n_sym,pathgains2,sampIdx);
123 - elseif k==2
124     % ESTIMACIÓN DE CANAL - ECUALIZACIÓN DE LA SEÑAL RESULTANTE
125     rx_datos_ec2=estimacion_ls(datos_rx2,n_sym,preambulo);
126 - end
127
128 % Estimación de la inf. del usuario 1 para cancelarlo
129 - [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack);
130
131 - datos_user_dem = qamdemod(rx_datos_ec2,M1,'OutputType','bit',...
132     'UnitAveragePower',true);%Demodulación
133
134 - datos_user_dec = vitDecoder1(datos_user_dem); % Decodificación FEC
```

Segmento de código 2.23. Estimación de la información de la capa 1

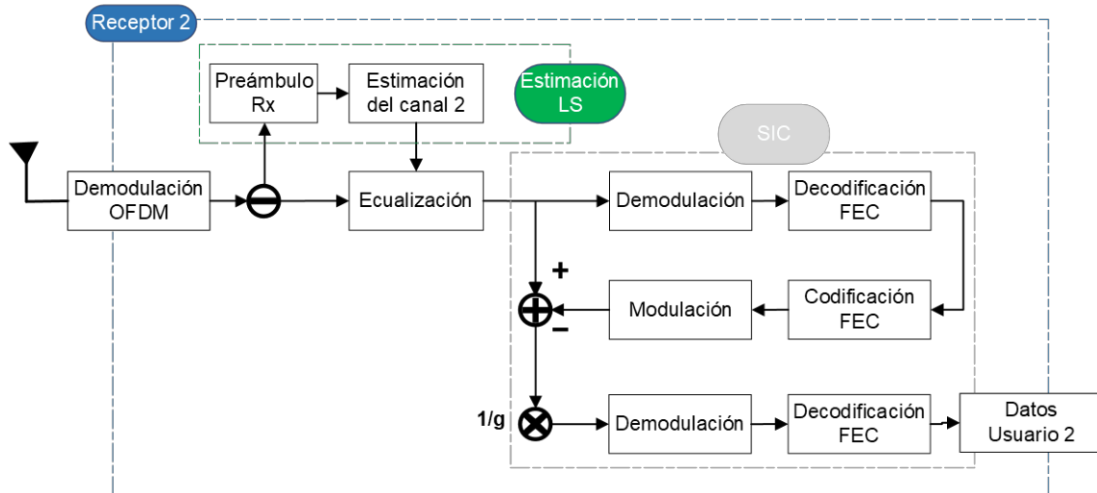


Figura 2.6. Receptor 2 con estimación de canal LS

2.3.2.1 Cancelación de la señal con mayor potencia

Para realizar la cancelación de la señal del usuario 1, la variable *datos_user_dec* es codificada y modulada nuevamente como se observa en la figura 2.6. En el segmento de código 2.24 se presenta la codificación necesaria para realizar este proceso.

```

135 - [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack);
136 - datos_user_cod = convEncoder1([datos_user_dec(traceBack+1:end);...
137     zeros(traceBack,1)]); % Codif. FEC(nuevamente)
138
139 - datos_user1_estimado = qammod(datos_user_cod,M1,'InputType','bit',...
140     'UnitAveragePower',true); % Modulación(nuevamente)

```

Segmento de código 2.24. Recodificación y remodulación de la señal de la capa 1

En el segmento de código 2.25 se muestra cómo se recupera los datos de la capa 2, para esto, la variable que contiene los datos de la capa 1 *datos_user1_estimado* se resta a los datos ecualizados *rx_datos_ec2* que contiene la información de ambas capas. El resultado de esta operación es dividido para *g* y se obtiene los datos de la capa 2.

```

142 - % Resta de la señal est. del usuario 1 a la señal resultante
143 - datos_user2=(rx_datos_ec2-datos_user1_estimado)./g;

```

Segmento de código 2.25. Cancelación de la señal de la capa 1

2.3.2.2 Demodulación de la señal de la capa 2

La demodulación de la señal de la capa 2 se realiza mediante la función *qamdemod* del *Communications Toolbox*. Los parámetros de entrada de esta función se explicaron en la sección 2.1.5. La señal demodulada se guarda en la variable *datos_user2_dem* como se indica en el segmento de código 2.26.

```

144 - datos_user2_dem = qamdemod(datos_user2,M2,'OutputType','bit',...
145     'UnitAveragePower',true); % Demodulación

```

Segmento de código 2.26. Demodulación de la señal de la capa 2

2.3.2.3 Decodificación de la señal de la capa 2

La decodificación FEC de la señal de la capa 2 se presenta en el segmento de código 2.27, esta se realiza mediante la configuración del objeto *vitDecoder2* realizado previamente en el segmento de código 2.5. La información del usuario 2 se guarda en la variable *info_user2*.

```

147 - info_user2 = vitDecoder2(datos_user2_dem); % Decodificación FEC

```

Segmento de código 2.27. Decodificación de la señal de la capa 2

2.4 CÁLCULO DE ERRORES

El parámetro mediante el cual se analiza el rendimiento del sistema de comunicaciones NOMA - OFDM es el BER, que representa la cantidad de bits errados recibidos con respecto al número total de bits de información transmitidos. El segmento de código 2.28 muestra la inicialización de las variables para el cálculo del BER.

```

44 - vt=(pilot_sub+data_sub)/Nfft; % Variable auxiliar
45 - SNR_dB=EbNo_dB-10*log10((1/(k1*n1*vt))+((g^2)/(k2*n2*vt))); % Eb/No a SNR
46 - BER1=zeros(1,length(SNR_dB)); % Inicialización de la variable BER1
47 - BER2=zeros(1,length(SNR_dB)); % Inicialización de la variable BER2

```

Segmento de código 2.28. Inicialización de variables para el cálculo del BER

La línea 45 del segmento de código 2.28, se desarrolla mediante la ecuación 2.10 el cual relaciona los parámetros E_b/N_0 , SNR y m (número de bits por subportadora), donde m depende de k , n y vt , su correspondiente expresión se muestra en la ecuación 2.7.

Para el desarrollo de la ecuación 2.10 se parte de la ecuación 2.6 que relaciona los parámetros E_b/N_0 , SNR y m .

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{SNR}{m} \quad (2.6)$$

$$m = \frac{1}{k \cdot n \cdot vt} \quad (2.7)$$

donde:

k es la tasa de codificación

n es el estado de modulación

vt es la relación entre el número de subportadoras pilotos y de datos para el número de subportadoras totales

De la ecuación 2.6 se obtiene la ecuación 2.8 que permite el cálculo del E_b/N_o total, resultante de las señales de la capa 1 y 2. La señal de la capa 2 es afectada por el factor de inyección denotado como α .

$$\frac{E_b}{N_o T} = \frac{SNR}{m_1} + (\alpha^2) \frac{SNR}{m_2} \quad (2.8)$$

Resolviendo la ecuación 2.8 y expresándolo en dB se obtiene la ecuación 2.9. La variable m se reemplaza según la ecuación 2.7.

$$\frac{E_b}{N_o T} [dB] = SNR [dB] + 10 \log \left(\frac{1}{k_1 \cdot n_1 \cdot vt} + \frac{\alpha^2}{k_2 \cdot n_2 \cdot vt} \right) \quad (2.9)$$

Por cómo está codificado el programa principal se presenta la ecuación anterior como se indica en la ecuación 2.10.

$$SNR [dB] = \frac{E_b}{N_o T} [dB] - 10 \log \left(\frac{1}{k_1 \cdot n_1 \cdot vt} + \frac{\alpha^2}{k_2 \cdot n_2 \cdot vt} \right) \quad (2.10)$$

donde:

k_1 es la tasa de codificación FEC de la capa 1

k_2 es la tasa de codificación FEC de la capa 2

n_1 es el estado de modulación de la capa 1

n_2 es el estado de modulación de la capa 2

2.4.1 CÁLCULO DEL BER

Mediante la función de Matlab *biterr* se calculan los valores de BER, esta función recibe como entradas la señal generada para el usuario antes de la transmisión y la señal decodificada por el receptor. El parámetro de salida *ratio* almacena el valor del BER de la iteración en curso y es adicionado al BER de manera acumulativa, esto se aprecia en la línea 115 del programa principal. El cálculo del BER del sistema de comunicación del usuario 1 se muestra en el segmento de código 2.29, y el segmento de código 2.30 detalla el cálculo del BER del sistema de comunicación del usuario 2.

```

112 - [number1, ratio1] = biterr(datos_c1(1:end-traceBack),...
113 -     info_user1((traceBack+1:end)));           % Cálculo del BER
114 -
115 - BER1(i)=BER1(i)+ratio1;                       % BER acumulativo user 1

```

Segmento de código 2.29. Cálculo de BER del usuario 1

```

148 - [number2, ratio2] = biterr(datos_c2(1:end-2*traceBack),...
149 -     info_user2((traceBack+1:end-traceBack))); % Cálculo del BER
150 -
151 - BER2(i)=BER2(i)+ratio2;                       % BER acumulativo user 2

```

Segmento de código 2.30. Cálculo de BER del usuario 2

El segmento de código 2.31 permite que el programa principal ejecute los dos casos de estimación, el primero con estimación de canal perfecta y el segundo con estimación de canal LS.

```

154 -     if k==1
155 -         BER1_sin(i)=BER1(i)/iter; % BER promedio
156 -         BER2_sin(i)=BER2(i)/iter; % BER promedio
157 -     elseif k==2
158 -         BER1_est(i)=BER1(i)/iter; % BER promedio
159 -         BER2_est(i)=BER2(i)/iter; % BER promedio
160 -     end

```

Segmento de código 2.31. Condición que permite guardar los valores de BER para estimación perfecta y LS

2.5 PRESENTACIÓN GRÁFICA DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para la presentación gráfica del rendimiento del sistema de comunicación NOMA - OFDM con estimación de canal perfecta y LS se ha codificado la función *graficar()* que se presenta en el segmento de código 2.32. Los parámetros de entrada principales de esta función son los vectores de BER de cada capa para ambos tipos de estimación y el vector de E_b/N_0 en dB.

```

1 function [K1,K2,mod1,mod2] = graficar(EbNo_dB,BER1_sin,BER2_sin,...
2 BER1_est,BER2_est,k1,k2,M1,M2,g_dB)
3 %% Gráfico de BER vs E_b/N_0
4 semilogy(EbNo_dB,BER1_sin,'r',EbNo_dB,BER1_est,'r--p',...
5 EbNo_dB,BER2_sin,'b',EbNo_dB,BER2_est,'b--h')
6 if k1==1/2
7     num1=1; dem1=2; K1='1'2';
8 elseif k1==2/3
9     num1=2; dem1=3; K1='2'3';
10 elseif k1==3/4
11     num1=3; dem1=4; K1='3'4';
12 end
13 if k2==1/2
14     num2=1; dem2=2; K2='1'2';
15 elseif k2==2/3
16     num2=2; dem2=3; K2='2'3';
17 elseif k2==3/4
18     num2=3; dem2=4; K2='3'4';
19 end
20 if M1==4
21     mod1='QPSK';
22 elseif M1==16
23     mod1='16QAM';
24 elseif M1==64
25     mod1='64QAM';
26 end
27 if M2==4
28     mod2='QPSK';
29 elseif M2==16
30     mod2='16QAM';
31 elseif M2==64
32     mod2='64QAM';
33 end
34 a1 = sprintf('C1 est. perf: %.0f/%.0f, %s\n',num1,dem1,mod1);
35 a2 = sprintf('C2 est. perf: %.0f/%.0f, %s\n',num2,dem2,mod2);
36 a3 = sprintf('C1 est. LS: %.0f/%.0f, %s\n',num1,dem1,mod1);
37 a4 = sprintf('C2 est. LS: %.0f/%.0f, %s\n',num2,dem2,mod2);
38 legend(a1,a3,a2,a4,'Location','southwest');
39 title(['NOMA-OFDM (BER vs Eb/N0)'];...
40 ['\fontsize{10} Estimación perfecta - Estimación LS (g = ',...
41 num2str(g_dB),' dB)']);
42 ylim([10^-4 10^0])
43 xlim([0 EbNo_dB(end)])
44 grid on
45 xlabel('E_b/N_0 [dB]'); ylabel('BER');

```

Segmento de código 2.32. Función graficar

Mediante las líneas de código 6 – 33 se validan las tasas de codificación y modulación de cada capa. El comando *legend* permite imprimir las etiquetas de las curvas del gráfico especificando los parámetros de simulación. Las líneas de código 42 y 43 definen los límites de los ejes del gráfico.

Los parámetros de salida de la función *graficar()* se utilizan para guardar el conjunto de variables de la simulación definiendo un nombre específico del archivo.mat, donde se indica las tasas de codificación, tipo de modulación, factor de inyección, número de iteraciones y cantidad de información transmitida. Esto se muestra en el segmento de código 2.33.

```
171 %% Guardar datos en un dataset.mat
172 - datos=length(info_user1)+length(info_user2);
173 - simulacion=['C1 k=' K1 ' ' mod1 ' - C2 k=' K2 ' ' mod2 ' g='...
174 - num2str(g_dB) 'dB' ' iter=' num2str(iter) ' ' num2str(datos)];
175 - save(simulacion);
```

Segmento de código 2.33. Guardar dataset de la simulación con un nombre específico

El segmento de código 2.34 permite generar automáticamente un archivo.png del gráfico de BER vs Eb/No con un nombre donde se especifica los parámetros de simulación.

```
177 %% Generar gráficos .png
178 - imagen=['C1 k=' K1 ' ' mod1 ' - C2 k=' K2 ' ' mod2 ' g=' num2str(g_dB)...
179 - 'dB' ' iter=' num2str(iter) ' ' num2str(datos) '.png'];
180 - saveas(gcf,imagen);
```

Segmento de código 2.34. Generación del gráfico .png con un nombre específico

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se evaluarán los resultados del funcionamiento y rendimiento de la estimación de canal del sistema de comunicación NOMA - OFDM mediante las gráficas de BER vs Eb/No. Para esto, los parámetros como tasa de codificación, tipo de modulación y valor del factor de inyección se definirán de tal manera que el usuario de la capa 1 como el usuario de la capa 2 presenten los mejores resultados.

3.1 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

La simulación del sistema de comunicación NOMA - OFDM se realizó en la versión 2019-A de Matlab. Para su desarrollo se establecieron ciertos parámetros fijos que se presentan en la tabla 3.1, estos valores se consideran para todas las gráficas que se presentan en este capítulo.

Tabla 3.1. Parámetros fijos del sistema

Detalle	Parámetro	Valor (es)
Modulador OFDM	Núm. de símbolos OFDM/paquete	5
	Tamaño de la IFFT	64
	Núm. de subportadoras de datos	48
	Núm. de subportadoras piloto	4
	Tamaño del prefijo cíclico	16
	Índice de las subportadoras piloto	12, 26, 40, 54
Codificador	traceBack	32
Canal de Rician	Núm. de rayos	4
	Potencia de los rayos	0, -8, -10, -15 dB
	Retardo relativo	0, 100, 200, 300 ns
	Ancho de banda total	10 MHz
	Frecuencia Doppler	0 Hz
	Parámetro del canal de Rician (K)	10

Los datos de cada usuario se generan aleatoriamente en base a la configuración de la tasa de codificación, tipo de modulación y número de símbolos OFDM. Los mejores resultados del sistema se presentan cuando la codificación y técnica de modulación de las capas son robustas, sin embargo, esto implica que la cantidad de información transmitida no sea la más óptima. Con esta premisa se analizará diferentes combinaciones de parámetros configurables de tal manera que se obtenga un sistema de comunicación eficiente.

Para el análisis del sistema de NOMA-OFDM con estimación de canal LS y esquema de distribución de pilotos tipo bloque se asume sincronización perfecta entre el transmisor y

receptor. Además, se considera un canal con desvanecimiento de Rician con un PDP (Perfil de Potencia) no tan severo con respecto a un canal con desvanecimiento de Rayleigh como se especifica en la tabla 3.1.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones son presentados mediante las gráficas BER vs Eb/No, donde, el sistema NOMA - OFDM con la técnica de estimación de canal LS es comparado con un sistema con estimación de canal perfecta. La estimación de canal perfecta se realiza tomando en cuenta que se conoce la respuesta del canal.

Todas las simulaciones que se presentan en este capítulo se ejecutaron con 3000 iteraciones, con el objetivo de conseguir unas curvas bien definidas. Esto posibilita un adecuado análisis del rendimiento del sistema. En las gráficas de BER vs Eb/No se definen valores de tasas de codificación y tipo de modulación de tal manera que el sistema presente un buen rendimiento considerando los valores de BER.

Las curvas con línea sólida representan la estimación perfecta del canal en el sistema NOMA - OFDM, mientras que las curvas con línea entrecortada representan la estimación de canal LS del sistema de comunicación. Así mismo, las curvas de color rojo representan el rendimiento del sistema de la capa 1 (usuario 1) y las curvas de color azul representan el rendimiento del sistema de la capa 2 (usuario 2).

En la gráfica de la figura 3.1, la capa 1 se ha codificado empleando una tasa de $2/3$ con modulación 16QAM, mientras que en la capa 2 se ha empleado una tasa de codificación de $1/2$ con modulación 16QAM y un factor de inyección de -6 dB. La gráfica de la figura 3.2 se realizó con una tasa de codificación de $3/4$ y modulación 16QAM para la capa 1; y una tasa de $1/2$ con modulación 16QAM y factor de inyección de -6 dB para la capa 2.

La utilización de la técnica de estimación de canal LS provoca que las señales de los usuarios de la capa 1 y capa 2 se degraden con respecto a la estimación perfecta. Esto significa que se necesita un mayor valor de Eb/No para obtener un mismo valor de BER.

La degradación de la señal como consecuencia de la estimación LS se aprecia en la figura 3.1, donde para la estimación perfecta de la capa 1, un BER de 10^{-3} requiere un valor de Eb/No de 23,93 dB y con estimación LS para el mismo valor de BER se requiere un Eb/No de 26,6 dB, dando como resultado una diferencia de 2,67 dB. Esto significa que para la estimación LS se necesita 2,67 dB adicionales respecto a la estimación perfecta para obtener el mismo valor de BER.

Así mismo, para la estimación perfecta de la capa 2, un BER de 10^{-3} requiere un valor de 28,14 dB de E_b/N_0 y para la estimación LS se necesita 30,88 dB, dando una diferencia de 2,75 dB. De esta manera se comprueba la degradación de las señales como consecuencia de la estimación de canal con la técnica LS en ambas capas.

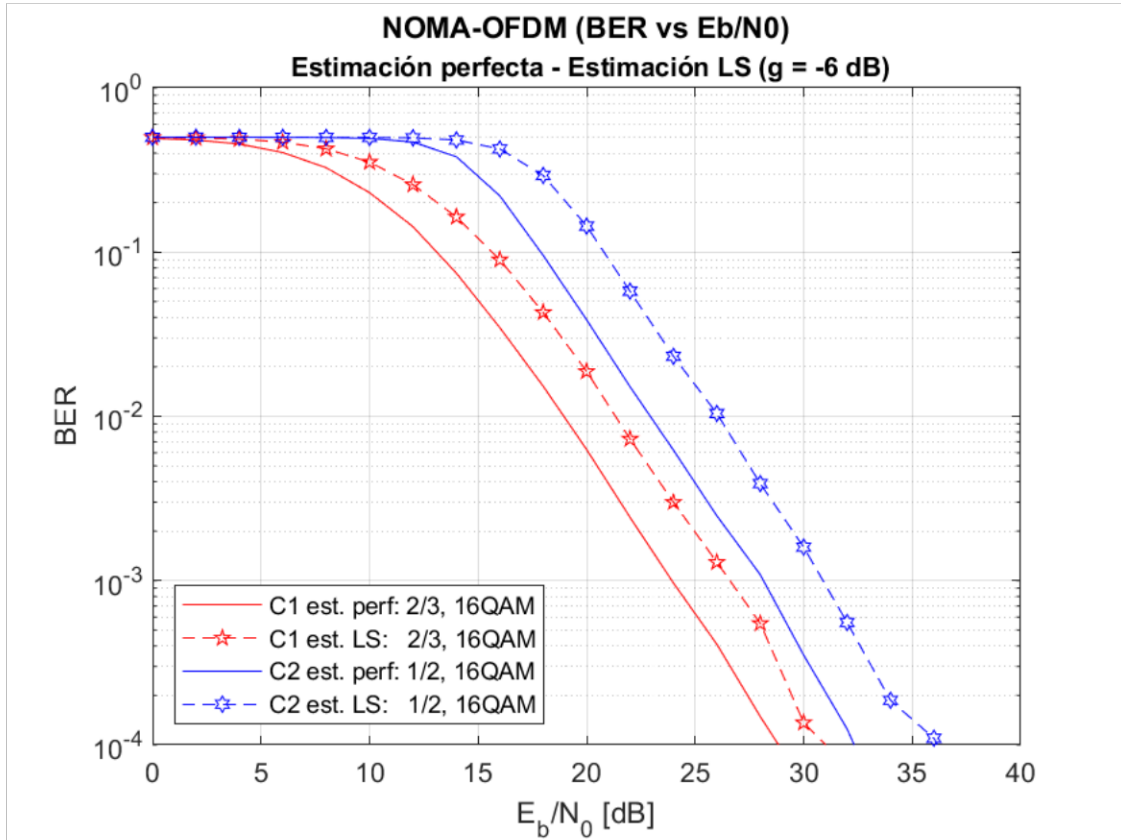


Figura 3.1. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación 2/3 y modulación 16QAM. Capa 2: tasa de codificación 1/2, modulación 16QAM y g de -6 dB.

En la figura 3.2, para conseguir un BER de 10^{-3} con estimación perfecta del canal la capa 1 requiere un E_b/N_0 de 26,44 dB, y con estimación LS se necesita un E_b/N_0 de 28,88 dB. Para la estimación perfecta de la capa 2 con el mismo valor de BER se necesita un E_b/N_0 de 28,06 dB y para la estimación LS se requiere 31,07 dB. Para la capa 1 la degradación de la señal es de 2,44 dB y para la capa 2 la degradación es de 3,01 dB.

En las figuras 3.1 y 3.2, los parámetros de simulación se han definido en base a que el sistema de comunicación presente un adecuado rendimiento. Evaluando los valores de E_b/N_0 que se requieren para conseguir un BER de 10^{-3} , se puede decir que la configuración de los parámetros de la figura 3.1 necesita menores valores de E_b/N_0 , por lo cual ofrece un mejor rendimiento del sistema de comunicación.

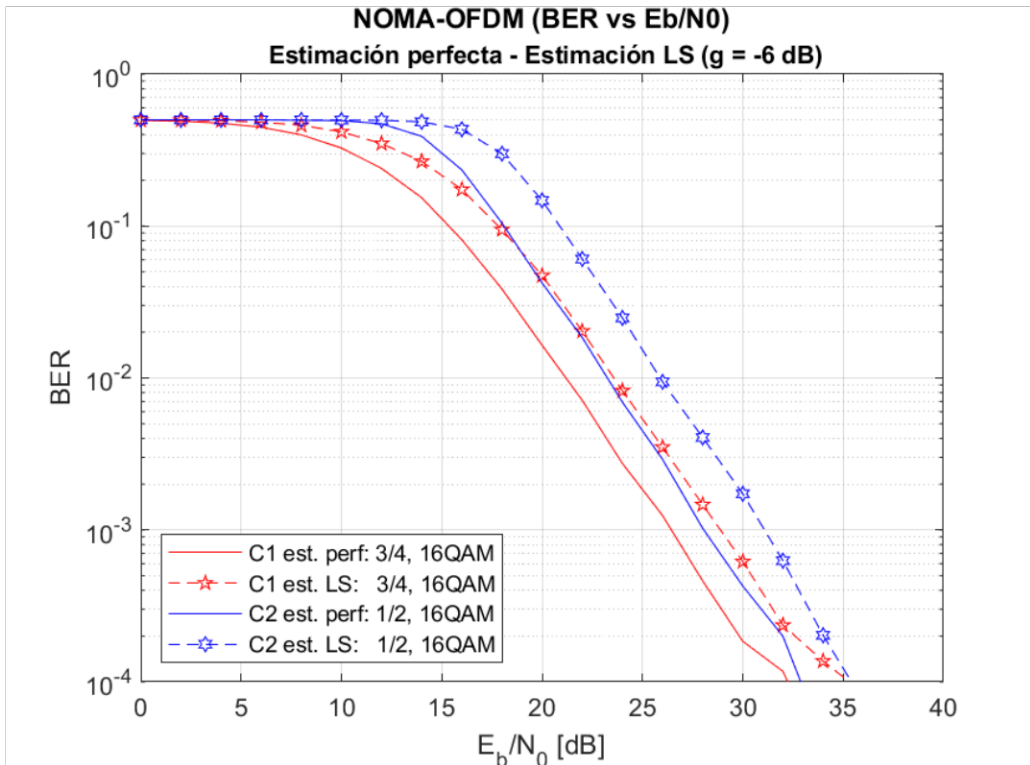


Figura 3.2. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación 3/4 y modulación 16QAM. Capa 2: tasa de codificación 1/2, modulación 16QAM y g de -6 dB.

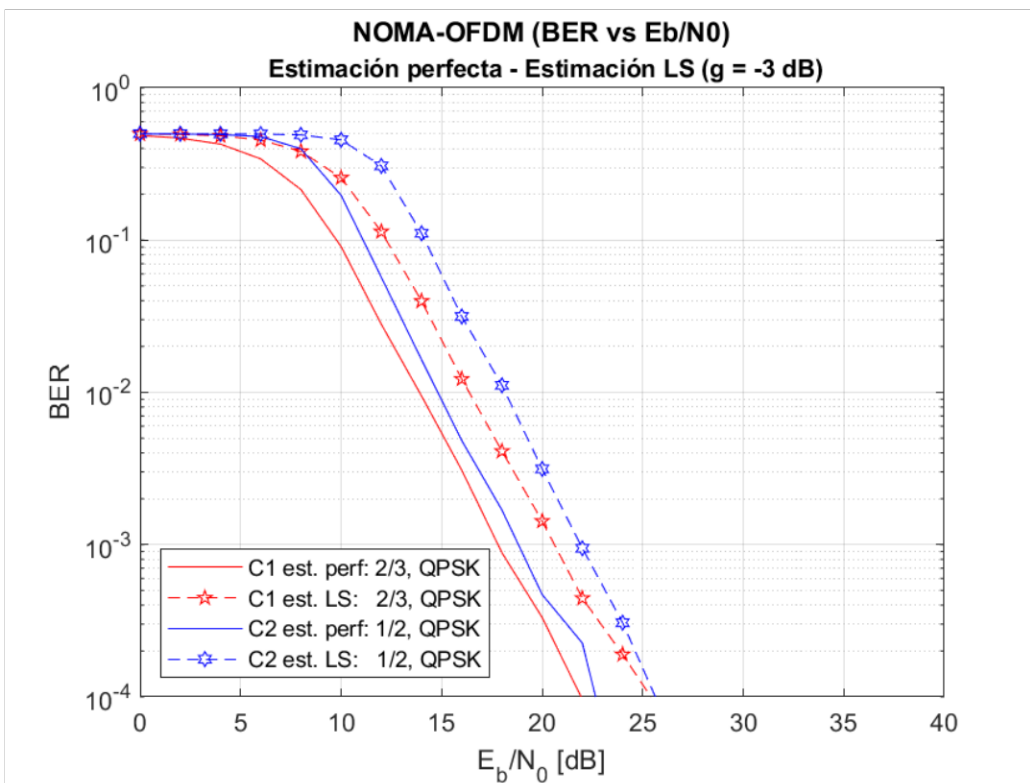


Figura 3.3. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación 2/3 y modulación QPSK. Capa 2: tasa de codificación 1/2, modulación QPSK y g de -3 dB.

En la figura 3.3 se presenta un sistema que obtiene un muy buen BER en las dos capas. El sistema se ha configurado con tasas de $2/3$ y $1/2$ para las capas 1 y 2 respectivamente, con una modulación QPSK para ambas capas y un factor de inyección de -3 dB. La utilización de parámetros que ofrecen mayor robustez a las señales implica menor cantidad de información transmitida en el mismo ancho de banda, ocasionando así una disminución considerable en la eficiencia espectral de la comunicación.

En la figura 3.4 el sistema se ha configurado con tasas de codificación $3/4$ y $1/2$, y modulación 16QAM y 64QAM para la capa 1 y 2 respectivamente, con un factor de inyección de -6 dB de tal manera que la eficiencia del sistema de comunicación sea la mejor, considerando la cantidad de información transmitida. Sin embargo, para esto se requiere mayores valores de E_b/N_0 para un BER de 10^{-3} como se puede evidenciar en la figura donde las curvas del BER se han desplazado a la derecha para todos los casos.

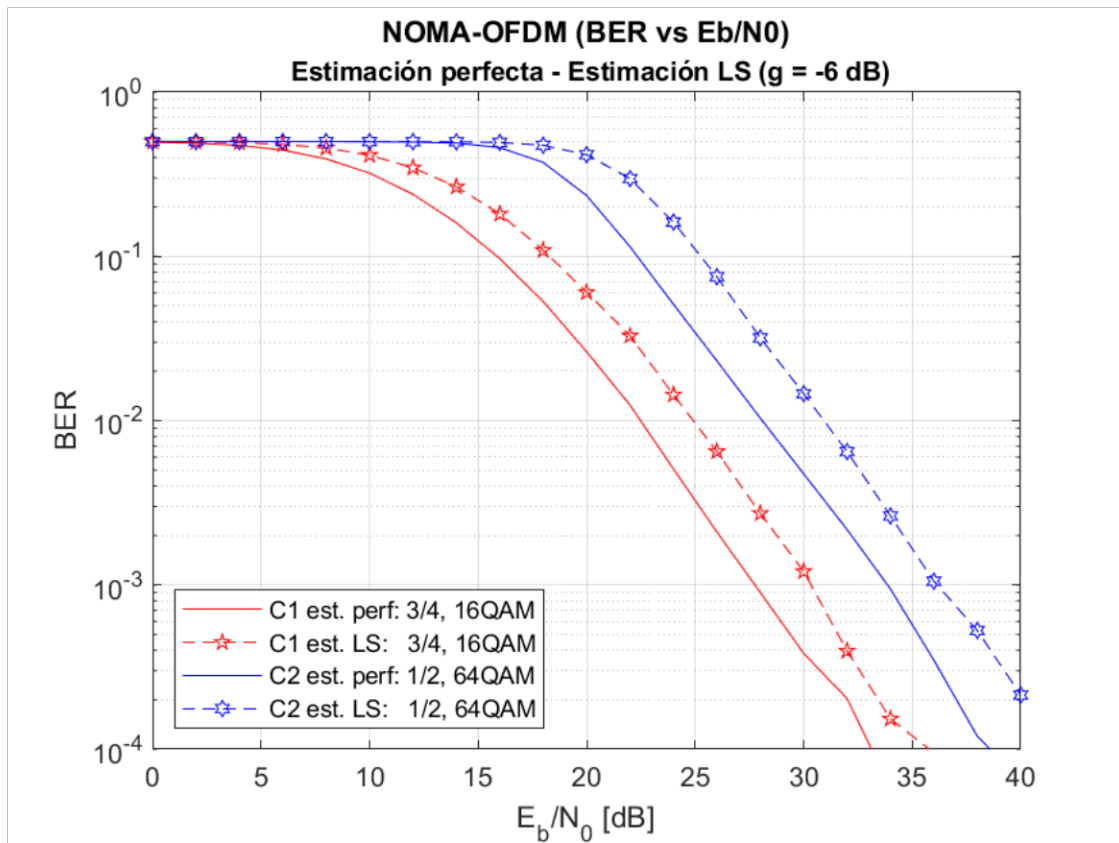


Figura 3.4. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación $3/4$ y modulación 16QAM. Capa 2: tasa de codificación $1/2$, modulación 64QAM y g de -6 dB.

En la tabla 3.2, se presenta una comparación de los valores de E_b/N_0 necesarios para conseguir un BER de 10^{-3} , así como también el número de bits transmitidos con cada combinación de configuración. Estos valores permiten analizar el rendimiento y eficiencia

del sistema de comunicaciones. La primera configuración corresponde a la figura 3.3, la segunda es la configuración de la figura 3.1, la tercera es la configuración de la figura 3.2 y la última es presentada por la figura 3.4.

Tabla 3.2. Resultados de las pruebas realizadas

Conf.	BER	Estimación	Capa	k	M	g [dB]	No. bits Tx.	Eb/No [dB]
1	10^{-3}	Perfecta	1	2/3	QPSK		560	17,8
			2	1/2	QPSK	-3		18,82
		LS	1	2/3	QPSK		560	20,61
			2	1/2	QPSK	-3		21,91
2	10^{-3}	Perfecta	1	2/3	16QAM		1120	23,93
			2	1/2	16QAM	-6		28,14
		LS	1	2/3	16QAM		1120	26,6
			2	1/2	16QAM	-6		30,88
3	10^{-3}	Perfecta	1	3/4	16QAM		1200	26,44
			2	1/2	16QAM	-6		28,06
		LS	1	3/4	16QAM		1200	28,88
			2	1/2	16QAM	-6		31,07
4	10^{-3}	Perfecta	1	3/4	16QAM		1440	27,75
			2	1/2	64QAM	-6		33,86
		LS	1	3/4	16QAM		1440	30,34
			2	1/2	64QAM	-6		36,15

Los valores de Eb/No que se muestran en la tabla 3.2 evidencian que la estimación de estado de canal con la técnica LS degrada la señal. Esto sucede en la realidad ya que no es posible realizar una estimación perfecta debido a la naturaleza del canal inalámbrico.

La primera configuración caracterizada por la robustez de las señales, requiere menores valores de Eb/No por lo cual se podría decir que este sistema ofrece un buen rendimiento, sin embargo, se limita la tasa de transmisión ya que la cantidad de información transmitida es menor respecto de las demás configuraciones. Hay que recordar que la cantidad de información generada para cada usuario depende de la tasa de codificación y modulación, tal y como se indicó en el segmento de código 2.2.

Al comparar el número de bits transmitidos se puede notar que la mayor cantidad de información se transmite con la configuración 4, donde la capa 1 es codificada con una tasa de 3/4 y modulada con 16AQM, y la capa 2 es codificada con una tasa de 1/2 y modulada con 64QAM. La tasa de codificación de 3/4 es menos robusta pero más eficiente con respecto a la cantidad de información transmitida, ya que por 3 bits que entran al codificador solamente se añade 1 bit de redundancia. En cambio, en la tasa de codificación de 1/2 por cada bit que entra al codificador se añade 1 bit de redundancia, por lo tanto con tasas menos robustas se consigue una mayor eficiencia espectral en la

transmisión de información pero comprometiendo el rendimiento del sistema, ya que para obtener un BER de 10^{-3} es necesario un mayor valor de E_b/N_0 .

Al aumentar el número de estados de modulación es posible enviar más información, sin embargo, aumentan las exigencias de E_b/N_0 para un BER determinado. Esto se debe a que la separación entre estados de señal adyacente decrece y aumenta la probabilidad de error, por lo que se debe aumentar la potencia para mantener la calidad.

La configuración con la que se presenta un buen rendimiento del sistema NOMA - OFDM con estimación de canal LS y sin comprometer la cantidad de información transmitida se da con la segunda configuración, donde para un BER de 10^{-3} se requiere un E_b/N_0 de 26,6 dB para la capa 1 y 30,88 dB para la capa 2. La cantidad de información que se transmite con esta configuración es de 1120 bits.

3.2.1 INFLUENCIA DEL FACTOR DE INYECCIÓN

El valor del factor de inyección define el grado de atenuación que presenta la señal de la capa 2. En la figura 3.5 se presentan las curvas de BER vs E_b/N_0 de la estimación de canal LS para 3 valores diferentes del factor de inyección.

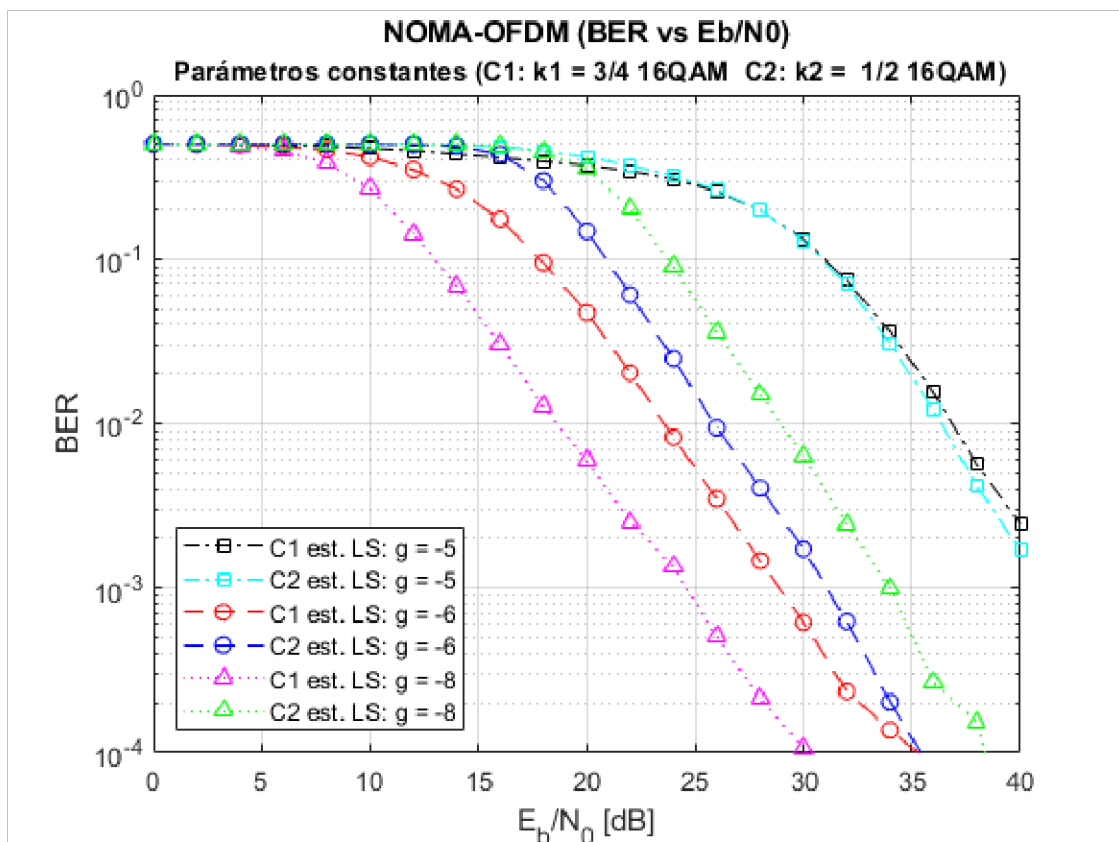


Figura 3.5. BER vs E_b/N_0 . Estimación de canal LS para distintos valores de g .

Todas las simulaciones de la figura 3.5 se realizaron con tasas de codificación de 3/4 y 1/2 para la capa 1 y 2 respectivamente, y la modulación utilizada es 16QAM para ambas capas. Las curvas de color negro y celeste corresponden a la configuración 1 como se presenta en la tabla 3.3, las curvas rojo y azul corresponden a la configuración 2 y las curvas morado y verde corresponden a la configuración 3.

Tabla 3.3. Resultados de simulaciones con diferentes valores de g

Conf.	BER	Capa	k	M	g [dB]	No. bits Tx.	Eb/No [dB]
1	10^{-2}	1	3/4	16QAM		1200	36,86
		2	1/2	16QAM	-5		36,35
2	10^{-2}	1	3/4	16QAM		1200	23,57
		2	1/2	16QAM	-6		25,88
3	10^{-2}	1	3/4	16QAM		1200	18,62
		2	1/2	16QAM	-8		28,94

En la primera configuración de la tabla 3.3, el factor de inyección de -5 dB no atenúa lo suficiente a la señal de la capa 2, provocando que las señales de ambas capas se interfieran y se reduzca considerablemente el rendimiento del sistema, esto se comprueba mediante los valores de Eb/No presentados en la tabla 3.3 necesarios para obtener un BER de 10^{-2} . Si el factor de inyección toma valores de -3 o -4 dB con esta configuración, la recuperación de las 2 señales no sería posible ya que la interferencia de la señal de la capa 2 hacia la capa 1 sería aún mayor.

La segunda configuración es la más adecuada para la estimación LS en el sistema NOMA - OFDM, ya que la señal de la capa 2 no interfiere con la señal de la capa 1. Para conseguir un BER de 10^{-2} es necesario un Eb/No de 23,57 dB y 25,88 dB para las capas 1 y 2, respectivamente. Estos valores de Eb/No muestran que ambas señales pueden ser recuperadas en recepción.

La última configuración, donde el factor de inyección tiene un valor relativamente menor a los anteriores, favorece las características de la señal de la capa 1 ya que para un BER de 10^{-2} se necesita un Eb/No de 18,62 dB, sin embargo, esto afecta a la señal de la capa 2 ya que se requiere un Eb/No de 28,94 para el mismo valor de BER. Esto se debe a que la información de la capa 2 fue atenuada hasta tal punto que es comparable al ruido de la señal. Si el grado de atenuación es muy grande puede darse el caso donde el receptor de la señal 2 no sea capaz de recuperar su información.

3.2.2 TASA DE CODIFICACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE CANAL LS

La tasa de codificación del sistema NOMA - OFDM determina que tan robusta es la señal que va a ser transmitida por el canal inalámbrico. En la figura 3.6 se presenta la influencia de la tasa de codificación en el rendimiento del sistema. Para su análisis se establecieron parámetros fijos donde varía únicamente la tasa de codificación de la capa 2, como se presenta en la figura 3.6.

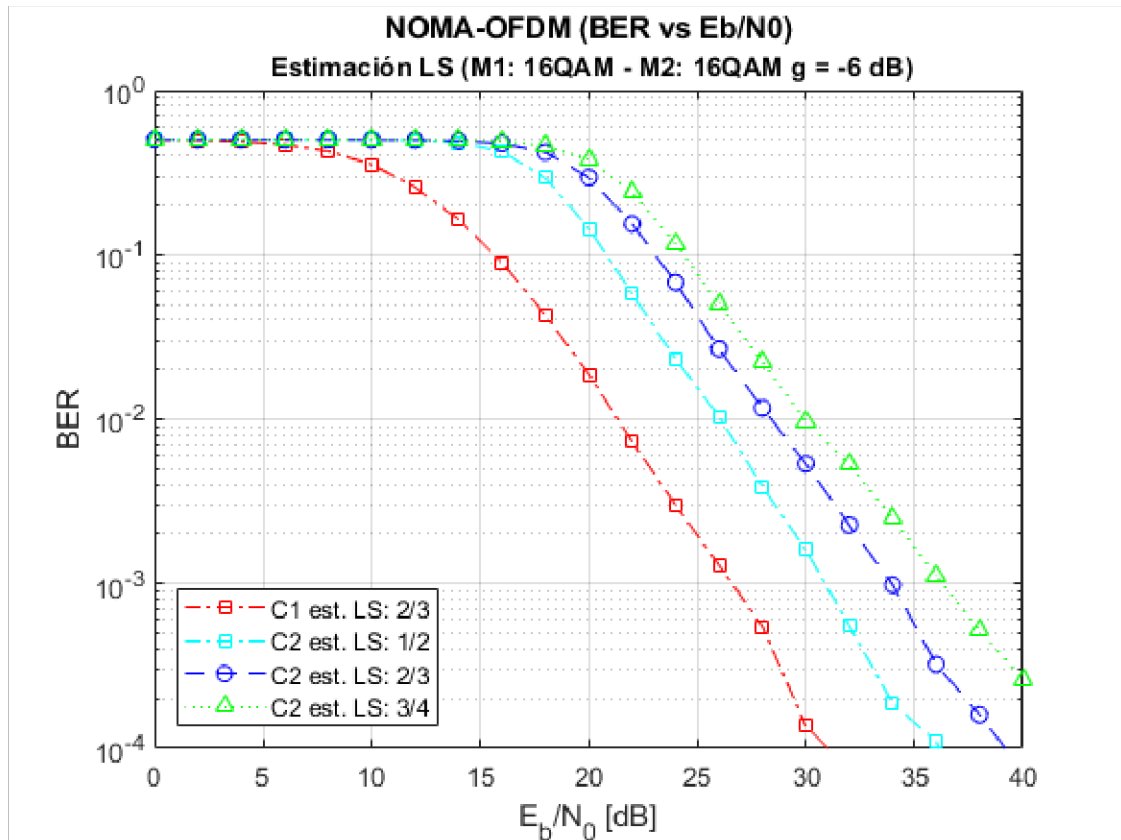


Figura 3.6. BER vs Eb/No. Estimación de canal LS para distintos valores de k .

En la figura 3.6, la señal estimada con la técnica LS de la capa 1 es la misma para las 3 configuraciones y se representa por la curva de color rojo. Las curvas de las señales de la capa 2 estimadas presentadas mediante las líneas de color celeste, azul y verde, muestran que mientras más robusta es la tasa de codificación de la capa 2, el E_b/N_0 necesario para conseguir un BER de 10^{-3} es menor. En la tabla 3.4 se indica que para la configuración más robusta con tasa de 1/2 en la capa 2 se necesita un E_b/N_0 de 30,89 dB, mientras que para la segunda configuración es necesario un E_b/N_0 de 33,95 dB para conseguir el mismo BER. En la última configuración se requieren 36,6 dB de E_b/N_0 para un BER de 10^{-3} .

Tabla 3.4. Resultados de simulaciones con diferentes valores de k

Conf.	BER	Capa	k	M	g [dB]	No. bits Tx.	Eb/No [dB]
1	10^{-3}	1	2/3	16QAM		1120	26,6
		2	1/2	16QAM	-6		30,89
2	10^{-3}	1	2/3	16QAM		1280	26,34
		2	2/3	16QAM	-6		33,95
3	10^{-3}	1	2/3	16QAM		1360	26,43
		2	3/4	16QAM	-6		36,3

En base a los valores de Eb/No de la tabla 3.4 se puede decir que la configuración que presenta un mejor rendimiento es la primera, sin embargo, con la tercera configuración se envía la mayor cantidad de información. En un sistema de comunicaciones se busca la transmisión de la mayor cantidad de información utilizando los mismos recursos, por lo cual se puede sacrificar en la medida que sea posible la robustez de la señal para que la transmisión sea eficiente respecto al volumen de información transmitido.

3.3 CONCLUSIONES

- Al combinar OFDM con la técnica NOMA se consigue mejorar la eficiencia espectral ya que se envía mayor cantidad de información con respecto a la técnica OFDM.
- Para realizar la estimación de un canal selectivo en frecuencia con desvanecimiento de Rician, la distribución de pilotos tipo bloque es la más adecuada ya que su implementación no es complicada. Esto es posible ya que se considera un canal que no varía en el tiempo, por lo que la configuración tipo bloque sirve para estimar el estado del canal en todos los símbolos OFDM.
- La estimación de canal con la técnica LS con una distribución de pilotos tipo bloque, permite conocer los estados de canal para que sea posible recuperar la señal por el receptor mediante el proceso de ecualización. Esto funciona adecuadamente si el canal es selectivo en frecuencia e invariante en el tiempo, en cambio si el canal presenta variaciones en el tiempo se debe utilizar técnicas de estimación más complejas como el MMSE con diferentes esquemas de distribución de pilotos.
- La transmisión de una señal robusta ayuda a que no sea afectada en gran medida por el canal inalámbrico. El rendimiento del sistema aumenta ya que se requiere

de valores menores de E_b/N_0 para un BER determinado, sin embargo, la tasa de transmisión disminuye debido a que se tiene menor cantidad de bits transmitidos en cada subportadora de datos.

- Considerando la obtención de un buen rendimiento del sistema de comunicaciones NOMA - OFDM sin comprometer la cantidad de información a transmitir, la capa 1 puede ser codificada con tasas de $2/3$ y $3/4$, mientras que la capa 2 presenta mejores respuestas cuando es codificada con una tasa de $1/2$.
- El mejor esquema de modulación para la capa 1 es 16QAM, ya que con una modulación de 64QAM las señales de ambas capas se degradan drásticamente. Con QPSK, el rendimiento de la capa 1 mejora, pero la capa 2 se degrada considerablemente. La capa 2 puede ser modulada con QPSK, 16QAM o 64QAM, sin embargo, un mayor número de estados de modulación conlleva a una mayor probabilidad de error, por lo cual se debe considerar si se desea un sistema de comunicación con alta eficiencia espectral o con un alto rendimiento considerando los valores de E_b/N_0 que se requieren para obtener un BER determinado.
- El sistema de recepción de la capa 2 es más complejo que el de la capa 1 ya que para recuperar la información es necesario realizar el proceso adicional de SIC, en cambio el receptor de la capa 1 recupera la información fácilmente considerando a la información de la capa 2 como ruido
- El factor de inyección utilizado en la atenuación de la señal de la capa 2 influye en gran medida el rendimiento del sistema de comunicación. Este factor con un valor de -6 dB presenta las mejores características de rendimiento del sistema. Si el factor es muy grande, es decir cercano a 1 en veces, la señal de la capa 2 interfiere con la señal de la capa 1 por lo que no se puede recuperar ninguna señal. Si el factor de inyección es muy pequeño, es decir cercano a 0 en veces, el rendimiento de la señal de la capa 1 mejora, pero la señal de la capa 2 es atenuada hasta el punto de que no se puede recuperar debido a que es considerado como ruido.

3.4 RECOMENDACIONES

- Para realizar la simulación de un sistema de comunicaciones es necesario instalar el *Communications Toolbox* de Matlab, ya que contiene algoritmos y funciones necesarios para codificar el sistema.

- El número de iteraciones de la simulación influye en la definición de las curvas de BER vs E_b/N_0 , es decir, si se desea unas curvas bien definidas se debe manejar como mínimo 3000 iteraciones. El tiempo de simulación depende de los recursos del equipo donde se ejecuta el programa, por lo cual este debe tener buenas características de procesamiento.
- Como trabajo futuro se puede realizar la estimación de un canal variante en el tiempo donde se utilice la distribución de pilotos *comb type* y compararlo con la estimación de un canal no variante en el tiempo.

4 REFERENCIAS

- [1] S. C. Yong, K. Jaekwon, Y. Y. Won y G. K. Chung, MIMO-OFDM Wireless communications with Matlab, Singapore: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] J. Angjo, M. M. Tuncer, E. Akertek, H. Alakoca, M. Başaran y L. Durak-Ata, "On the Channel Estimation Performance of NOMA Systems: Experimental Implementation of Real-Time Downlink NOMA-OFDM," de *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234965, 2020, pp. 1-6.
- [3] Z. Ding, F. Adachi y H. V. Poor, "The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, nº 1, pp. 537-552, 2016.
- [4] M. B. Balogun, F. Takawira y O. O. Oyerinde, "Weighted Least Square Based Iterative Channel Estimation for Uplink NOMA-OFDM Systems," de *2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2019, pp. 1-5.
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles & Practice*, USA: Prentic Hall PTR, 2002.
- [6] J. Leyva y D. Beltrán, "La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60 GHz," *Universidad y Sociedad*, vol. 8, nº 2, 2016.
- [7] F. Zuñiga, "Análisis de las diferentes técnicas de acceso para los servicios de multimedia en los sistemas inalámbricos de tercera generación (3G)," *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 2002.
- [8] W. Peng, X. Jun y P. Li, "Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, nº 3, pp. 4-11, 2006.
- [9] A. Asim, S. Boon Chong, H. Muhammad Amish y L. Xue Jun, "A Survey on Application of Non-Orthogonal Multiple Access to Different Wireless Networks," *Microwave and Wireless Communications*, vol. 8, nº 11, 2019.

- [10] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri y A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 48, n° 3, pp. 223-229, 2002.
- [11] J.-J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. Wilson y P. Borjesson, "On channel estimation in OFDM systems," de *1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference. Countdown to the Wireless Twenty-First Century*, 1995, pp. 815-819.
- [12] M. Biguesh y A. Gershman, "Training-based MIMO channel estimation: a study of estimator tradeoffs and optimal training signals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, n° 3, pp. 884-893, 2006.
- [13] R. Hernández Sampiere, *Metodología de la investigación*, México D.F.: McGRAW-HILL, 2014.

5 ANEXOS

ANEXO I. Simulación de la estimación de canal de un sistema de comunicaciones NOMA - OFDM.

ANEXO I

Anexo digital