

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

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

**SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA NOMA USANDO CODIFICACIÓN
CONVOLUCIONAL Y UN CANAL AWGN**

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

KARINA GUADALUPE PRADO SANDOVAL

karina.prado@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO

diego.reinoso@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Karina Guadalupe Prado Sandoval, 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.

KARINA GUADALUPE PRADO SANDOVAL

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Karina Guadalupe Prado Sandoval, bajo mi supervisión.

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.

KARINA GUADALUPE PRADO SANDOVAL

DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO

DEDICATORIA

A mis queridos y amados padres Jorge y Elsa; quienes me brindan su afecto, paciencia y amor incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, a mis padres, quienes pese a todas las dificultades me apoyan y me brindan su amor.

A mis hermanos Jorge Luis y Michelle por su cariño y apoyo incondicional.

A María Belén, Jorge Sebastián y Victoria Guadalupe por su cariño, ocurrencias y tantas alegrías. Y a mi familia por apoyarme.

A Christian por su apoyo y amor, gracias por estar siempre para mí y por todo este tiempo, por estar en mis días buenos y más aún en los malos.

A Merycita A. y Geovanni S. por brindarme su apoyo y consejos.

A mis compañeros y amigos de la poli que me brindaron su amistad y apoyo: muchas gracias por sus consejos, tiempo, experiencias vividas y sabiduría. Un agradecimiento especial a: Amanda, Alexandra, David y Andrés por su amistad, el tiempo compartido, consejos y apoyo; son y siempre serán muy importantes para mí, gracias por su amistad, cariño, locura y lealtad. Y a Erik un ser de luz.

Finalmente, quiero mostrar mi más profundo sentimiento de agradecimiento a mi director Dr. Diego Reinoso quien me brindó su guía, conocimientos, comprensión y paciencia para poder realizar este trabajo. Demostrándome siempre la gran calidad humana que posee.

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 Comunicaciones inalámbricas	3
1.4.2 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	4
1.4.3 Técnicas de acceso múltiple	6
1.4.4 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)	7
1.4.5 Beneficios en NOMA	8
1.4.6 Desafíos en NOMA.....	8
1.4.7 SC (Superposition Coding).....	10
1.4.8 SIC (Successive Interference Cancellation)	10
1.4.9 Asignación de potencia fija.....	10
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 Estructura del sistema de Comunicación NOMA.....	12
2.1.1 Parámetros configurables	13
2.1.2 Parámetros OFDM	13
2.2 Sistema de transmisión NOMA-OFDM.....	15
2.2.1 Generación de datos aleatorios	16
2.2.2 Codificación convolucional	16
2.2.3 Modulación	19
2.2.4 Suma de señales e inserción del factor de inyección.....	21
2.2.5 Modulador OFDM	22
2.3 Canal AWGN	23
2.4 Sistema de recepción NOMA	23

2.4.1	Usuario uno	25
2.4.2	Usuario dos.....	26
2.5	Generación del nombre del archivo.....	28
2.6	Parámetros involucrados para la medición del rendimiento.....	29
2.7	Cálculo de errores.....	30
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
3.1	Resultados	33
3.1.1	Impacto del factor de inyección.....	34
3.1.2	Impacto de la modulación	38
3.1.3	Impacto de la tasa de codificación	43
3.2	Conclusiones	47
3.3	Recomendaciones	49
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
5	ANEXOS	53

RESUMEN

NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) es considerada una prometedora técnica de acceso múltiple para las redes de quinta generación. Permite conectividad masiva e incrementa el rendimiento del sistema, logrando que múltiples usuarios compartan los mismos recursos, ya sea en tiempo, frecuencia o código. Esta técnica se centra en lograr una multiplexación no ortogonal, al introducir el dominio de la potencia y la tecnología SIC (*Successive Interference Cancellation*).

En el presente proyecto se realiza la simulación en MATLAB, de un sistema de comunicación inalámbrico empleando la técnica NOMA usando codificación convolucional, con diferentes modulaciones, tasas de codificación y factores de inyección sobre un canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Los resultados de la simulación se presentan mediante curvas de la BER (*Bit Error Rate*) vs. E_b/N_0 (*Energy per-bit to noise power spectral density ratio*).

El capítulo 1 exhibe la sustentación teórica del proyecto, en él se estudia el sistema NOMA, así como las ventajas y desafíos.

El capítulo 2 describe la implementación del sistema de comunicaciones NOMA-OFDM en MATLAB, el cual está compuesto por un transmisor, un receptor y un canal AWGN. Se explica brevemente la estructura mediante diagrama de bloques, y las funciones aplicadas en MATLAB.

El capítulo 3 muestra los resultados de las simulaciones, a través de las curvas de la BER vs. E_b/N_0 . Se analizan los resultados obtenidos en los distintos escenarios. Además, se expone las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

PALABRAS CLAVE: NOMA, SIC, dominio de potencia, factor de inyección.

ABSTRACT

NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) is considered a promising multiple access technique for fifth generation networks. NOMA enables massive connectivity and increases system performance by allowing multiple users to share the same resources, whether in time, frequency or code. This technique focuses on achieving non-orthogonal multiplexing by introducing power domain and SIC (*Successive Interference Cancellation*).

This project presents the simulation in MATLAB of a wireless communication system employing the NOMA technique, using convolutional coding, with different modulations, coding rates and injection factors over an AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) channel. The simulation results are presented by means of BER (Bit Error Rate) vs. E_b/N_0 (*Energy per-bit to noise power spectral density ratio*) curves.

Chapter 1 presents the theoretical background of the project, in which the NOMA system is studied, as well as its advantages and challenges.

Chapter 2 describes the implementation of the NOMA-OFDM communication system in MATLAB, which is composed of a transmitter, a receiver and an AWGN channel. The structure is briefly described by block diagram, and the functions implemented in MATLAB.

Chapter 3 shows the results of the simulations, through the BER vs. E_b/N_0 curves. The results obtained in the different scenarios are analyzed. It also presents the conclusions and recommendations of this technical study.

KEYWORDS: NOMA, SIC, power-domain, injection factor.

1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas tienen un enorme potencial, tanto para los consumidores como para la industria. La aparición de servicios de quinta generación 5G, da a lugar una sociedad hiperconectada y con ello la tecnología de las comunicaciones móviles enfrenta nuevos retos, como una alta eficiencia espectral y una conectividad masiva. Entre las características de la tecnología 5G, se establece una latencia de 1 ms, comparada con los 10 ms de 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) de LTE (*Long Term Evolution*), y una velocidad de datos de hasta 10 Gbps [1].

El diseño de una técnica de acceso múltiple adecuada, es uno de los aspectos más importantes para mejorar la capacidad del sistema. Una tecnología prometedora que resuelve algunos de los desafíos para la 5G es NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*). En contraste con las tecnologías de acceso múltiple ortogonal convencionales, NOMA ofrece beneficios entre ellos mejora la equidad de los usuarios, conectividad masiva e incrementa la eficiencia espectral, pues da cabida a muchos más usuarios mediante la asignación de recursos no ortogonales [2], [3].

Existen diferentes tipos de técnicas NOMA: en el dominio de la potencia y dominio de código. El presente proyecto se centra en simular un sistema de comunicaciones inalámbrico, basado en la técnica NOMA en el dominio de la potencia, usando codificación convolucional y un canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). La característica principal de NOMA en el dominio de la potencia, es permitir que diferentes usuarios compartan el mismo recurso, ya sea tiempo o frecuencia, pero con diferentes niveles de potencia. En el lado del transmisor se usa la codificación por superposición SC y en el lado del receptor se utiliza la técnica SIC (*Successive Interference Cancellation*), siendo esta última crucial para contar con una decodificación fiable [4], [5].

En OFDM, un grupo de canales de subportadora son accesibles para un usuario en un intervalo de tiempo dado. Al incorporar la técnica NOMA, las subportadoras asignadas al usuario con mala condición de canal, pueden ser compartidas con el usuario que tiene una buena condición de canal al mismo tiempo, con ello se logra emplear los recursos eficientemente [3].

Puesto que, en la simulación se realizará la multiplexación combinando dos flujos de datos, uno de los cuales se atenúa y permite la transmisión de varios flujos de datos en el mismo ancho de banda; esto implica una degradación en la tasa de errores de los usuarios. Por ello, se realizará simulaciones variando los parámetros de tasa de codificación, modulación

y factor de inyección, con el objetivo de determinar la combinación que ofrece las mejores tasas de errores en ambos usuarios.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular un sistema de comunicación inalámbrico con la técnica NOMA, usando codificación convolucional y un canal AWGN para evaluar su rendimiento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar la tecnología NOMA.
2. Implementar la simulación en MATLAB del sistema NOMA-OFDM.
3. Efectuar varias pruebas de funcionamiento, variando los parámetros de tasa de codificación, modulación y factor de inyección.
4. Analizar los resultados de las simulaciones obtenidas en función de las curvas BER (*Bit Error Rate*) vs E_b/N_0 (*Energy per-bit to noise power spectral density ratio*).

1.3 ALCANCE

En este componente se implementará una simulación en MATLAB de un sistema NOMA, que va a combinar dos flujos de datos (capa 1 y capa 2) que llegarán a dos usuarios. El sistema utilizará un codificador convolucional, que podrá generar tasas de 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6. Además, se podrá utilizar modulación QPSK, 16QAM o 64 QAM y el factor de inyección será un parámetro configurable. En el canal se tendrá solo ruido AWGN. El receptor del usuario 1 solo recuperará la capa 1, mientras que el otro usuario primero recupera la capa 1 para luego recuperar la capa 2. Se considera sincronización perfecta en el receptor. La simulación obtendrá como resultado la curva BER vs E_b/N_0 para cada usuario.

Este apartado contiene la metodología de tipo cuantitativa a emplearse. A continuación, se detalla las fases a seguir de tal manera que se logre cumplir con los objetivos determinados previamente [18].

- **Fase de diseño o planteamiento:** Una vez realizado un estudio de la tecnología NOMA-OFDM, se muestra su estructura a través de un diagrama de bloques,

detallando el motivo de cada uno de estos. El sistema se compone de tres partes esenciales: el transmisor, el canal AWGN y el receptor. También se menciona los parámetros que son configurables.

- **Fase de implementación:** Se selecciona MATLAB, la cual es una de las herramientas de simulación más empleadas hoy en día en el ámbito de la Ingeniería y comunicaciones, para simular la tecnología NOMA-OFDM. Existen opciones configurables como la modulación, tasa de codificación y factor de inyección, las cuales se utilizarán para analizar el rendimiento del sistema, mediante los resultados de la curva BER vs Eb/No para cada usuario.
- **Fase de pruebas o evaluación y el análisis de resultados:** Los parámetros de modulación (QPSK, 16QAM o 64QAM), tasa de modulación (1/2, 2/3, 3/4 y 5/6) y factor de inyección, se deberán configurar para cada usuario, con el fin de determinar la combinación que ofrece las mejores tasas de errores en ambos usuarios. Y analizar como influyen estos, en la recepción de datos. Se toma como herramienta de evaluación, tablas resumen de las gráficas BER vs Eb/No, ya que de esta forma se facilita la visualización del impacto que se obtiene al cambiar la configuración de algunos parámetros de la simulación.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

El desarrollo de las comunicaciones inalámbricas, ha generado una gran demanda por parte de los usuarios, los cuales requieren servicios más eficientes con altas velocidades de transmisión. La cantidad de usuarios y servicios requeridos aumentan constantemente, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías que satisfagan dichas necesidades.

La quinta generación tiene un papel importante en la cuarta revolución industrial, por tanto, pretende la sustitución del ser humano por máquinas en determinadas tareas para hacerlas más eficientes. En la Figura 1.1 se observa los casos de uso que abarca las comunicaciones 5G, según el catálogo de escenarios identificados por 3GPP para el IMT-2020 5G: banda ancha móvil mejorada eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), comunicaciones masivas de tipo máquina mMTC (*Massive Machine-Type Communications*) y servicios críticos basados en comunicación ultra fiable y extremada baja latencia URLLC (*Ultra-High Reliability & Low Latency*) [4], [6].

En lo que respecta a eMBB, que es una evolución de 4G, presenta un incremento en la velocidad de datos y mejora la latencia. En las comunicaciones URLLC, se permite el desarrollo de redes de sensores, servicios como la conducción autónoma, comunicación entre vehículos, seguridad en misiones, aplicaciones críticas, e infraestructura energética más eficiente (*Smart Grid*). En cuanto a mMTC, está orientado a la conexión masiva de dispositivos, por encima de un millón por kilómetro cuadrado, y cada dispositivo debe tener 10 años de autonomía [6].

Al igual que en 4G, el acceso múltiple de las comunicaciones de quinta generación se basa en OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Como se relata más adelante, NOMA es un gran candidato de acceso múltiple para versiones nuevas de 5G.

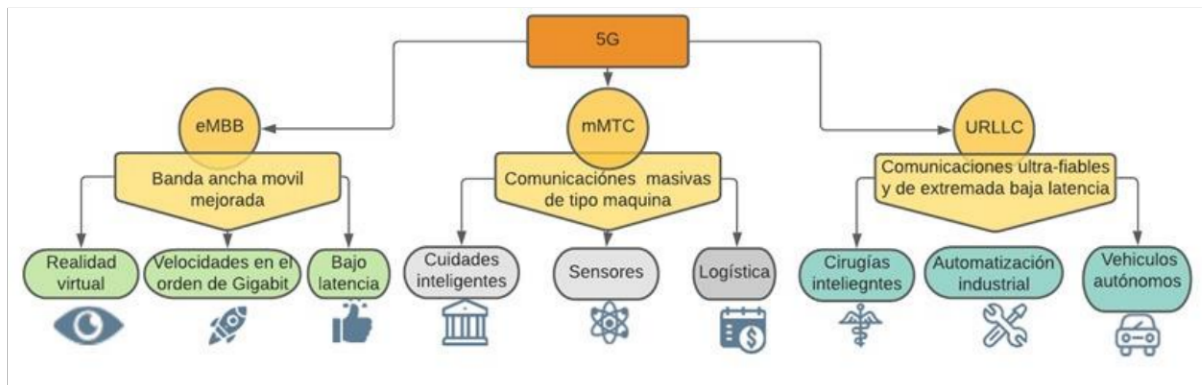


Figura 1.1. Casos de uso de la quinta generación.

1.4.2 OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING)

OFDM es una técnica de acceso al medio, utiliza múltiples portadoras ortogonales sobrepuestas, es decir, son un conjunto paralelo de sub-canales. Divide el ancho de banda en varias subportadoras y cada una se modula con un flujo de datos de baja velocidad [7].

OFDM tiene características que hace que sea buena para aplicaciones de banda ancha y altas velocidades. Permite el solapamiento de frecuencias incrementando así la capacidad, utiliza el espectro de forma eficiente, el desvanecimiento selectivo en frecuencia solo afecta a algunas subportadoras, utiliza el CP (*Cyclic Prefix*) para superar el ISI (*Intersymbol Interference*) [5], [8].

Las dificultades de OFDM son: problemas de PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*), alta sensibilidad a errores producidos por pérdida de sincronización ya sea en frecuencia o tiempo [5].

Por consiguiente, en la simulación realizada la forma de onda de la señal básica usada para NOMA es OFDM, aunque también se puede usar DFT-spread OFDM (*Discrete Fourier Transform Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) u otras técnicas.

1.4.2.1 IFFT

Un proceso clave dentro de un sistema OFDM es la DFT (*Discrete Fourier Transform*), que hace posible la representación del espectro de forma discreta. La IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) se encuentra en el transmisor y la DFT en el receptor. Mediante la IDFT se puede pasar del dominio de la frecuencia al del tiempo y en el receptor realizar el proceso opuesto. Para ejecutar la DFT/IDFT existen métodos efectivos, que evalúan con un menor número de operaciones, como la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) utilizada en el transmisor y la FFT (*Fast Fourier Transform*) en el receptor [9].

1.4.2.2 Prefijo cíclico

Cuando la señal OFDM atraviesa el canal se produce ISI (*Intersymbol Interference*) y si de igual manera se pierde la ortogonalidad de las subportadoras resulta la ICI (*Inter-carrier Interference*), la respuesta a esos inconvenientes es la inserción de una banda de guarda al inicio de cada uno de los símbolos para evitar la ISI, porque actúa como un espacio de protección entre símbolos sucesivos y para mitigar la ICI; dado que, cualquier réplica de la señal que llegue atrasada seguirá teniendo un número entero de ciclos, manteniendo a las subportadoras ortogonales. Dicha banda de guarda se llena con una extensión cíclica llamada prefijo cíclico (CP), que rellena la banda de guarda con una copia de las últimas muestras del símbolo [10]. En el receptor se lleva a cabo la supresión del prefijo cíclico.

En la Figura 1.2 se ilustra la inserción del prefijo cíclico. T_S es el tiempo o longitud del símbolo OFDM sin prefijo cíclico; T_{PC} corresponde a la longitud del prefijo cíclico, por lo cual, se tiene que $T = T_{PC} + T_S$; T representa la longitud del símbolo OFDM transmitido con prefijo cíclico.

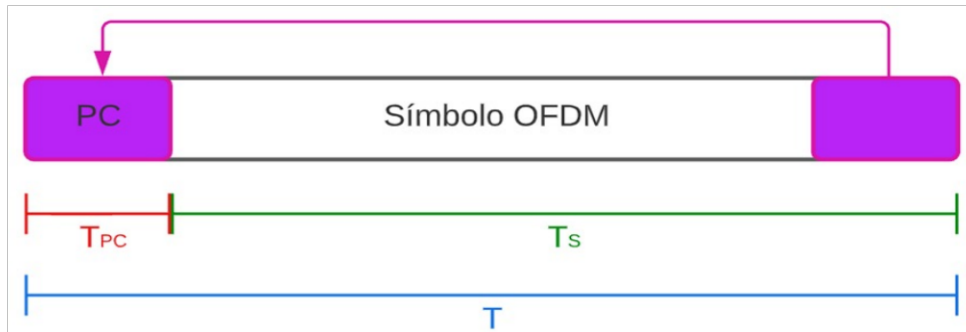


Figura 1.2. Símbolo OFDM con prefijo cíclico.

1.4.3 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE

Gracias a las técnicas de acceso múltiple, los usuarios comparten un mismo recurso de la forma más eficiente. Las técnicas de acceso múltiple pueden clasificarse en dos enfoques: el acceso OMA (*Orthogonal Multiple Access*) y el acceso NOMA [13].

Desde la primera generación hasta la cuarta generación, los esquemas de acceso múltiple han sido la tecnología clave para diferenciar los sistemas inalámbricos. Como se conoce el acceso múltiple para 1G (*First Generation*) es por FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), para 2G (*Second Generation*) el acceso es por TDMA (*Time Division Multiple Access*), para 3G (*Third Generation*) se usa CDMA (*Code Division Multiple Access*), y OFDMA para 4G (*Fourth Generation*); estos son esquemas OMA, en el cual los diferentes usuarios se asignan a recursos ortogonales en el dominio del tiempo, la frecuencia o el código para evitar las interferencias entre usuarios [2], [11].

El crecimiento de las comunicaciones inalámbricas exige más requerimientos. Por tanto, la eficiencia espectral, es uno de los principales retos a superar, además, se requiere conectividad masiva de usuarios y/o dispositivos, baja latencia y diversos tipos de servicios. Por consiguiente, son necesarias mejores tecnologías. Para abordar los desafíos de 5G (*Fifth Generation*), se tiene tecnologías como MIMO masivo, comunicaciones de ondas milimétricas y redes ultradensas [11].

En un esquema OMA los usuarios se multiplexan ortogonalmente en el dominio de la frecuencia, el tiempo o el código, permitiendo que el receptor separe con poca complejidad las señales no deseadas de la señal deseada, empleando diferentes funciones base [2]. Aunque OMA no presenta interferencia entre usuarios y tiene una baja complejidad de implementación, su eficiencia espectral debe mejorarse para complacer las exigencias actuales, razón por la cual se aborda el esquema NOMA.

1.4.4 NOMA (NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS)

NOMA es una técnica emergente evaluada dentro del 3GPP. Multiplexa los flujos de datos en diferentes capas superpuestas no ortogonales, utilizando diferentes niveles de inyección de potencia. Además, incrementa la eficiencia espectral en comparación con las técnicas de acceso múltiple ortogonal convencionales [12].

Con NOMA las subportadoras asignadas al usuario con malas condiciones de canal, pueden compartirse con el usuario que presenta buenas condiciones de canal, al mismo tiempo. El receptor recibe una superposición de señales de múltiples usuarios, la detección multiusuario se realiza a través de la técnica SIC ejecutada en el dominio de la potencia. En la Figura 1.3 se observa un sistema NOMA para dos usuarios [16].

En el desarrollo de SIC, los mensajes de múltiples usuarios se decodifican secuencialmente en orden decreciente de la potencia de la señal, basándose en la información del estado del canal [3]. Se decodifica en el receptor el usuario con menor relación señal a ruido, donde la señal deseada es detectada considerando las señales restantes como interferencia, mientras que para el usuario con alta relación señal a ruido, son removidas por el SIC [3]. Este proceso se detallará más adelante con claridad.

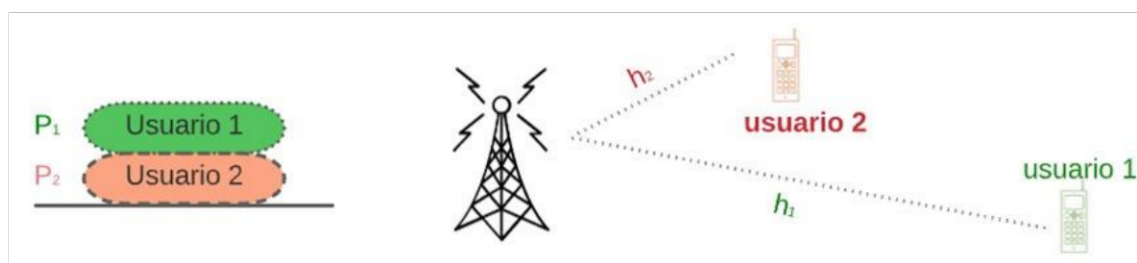


Figura 1.3. Sistema NOMA con dos usuarios.

En la Figura 1.4 se observa la clasificación de las técnicas NOMA disponibles, que pueden dividirse en dos categorías principalmente: dominio de potencia y dominio del código.

NOMA en el dominio de la potencia comparte todos los recursos disponibles (tiempo/frecuencia). En cambio, NOMA en el dominio del código utiliza secuencias de dispersión específicas del usuario, que son secuencias dispersas o secuencias de correlación cruzada no ortogonales de bajo coeficiente de correlación.

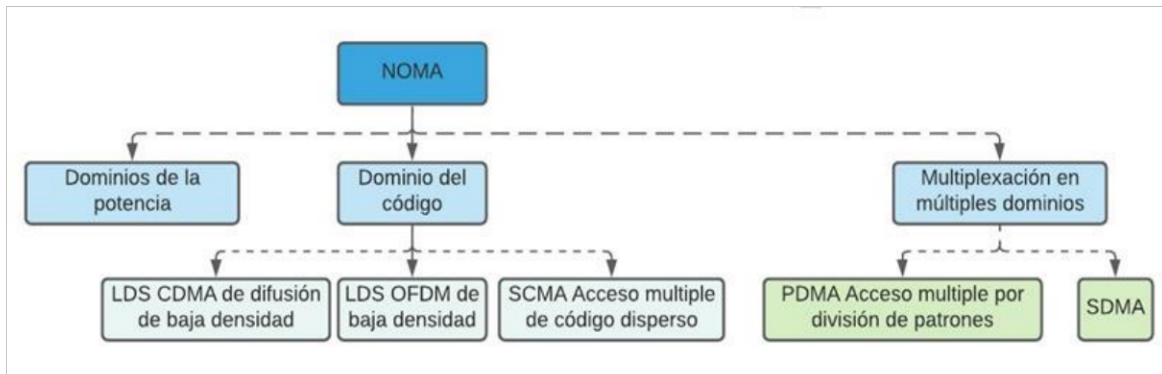


Figura 1.4. Clasificación de la técnica NOMA.

1.4.5 BENEFICIOS EN NOMA

- Mejora la eficiencia espectral y el rendimiento del sistema.
- Conectividad masiva: NOMA puede dar cabida a un mayor número de usuarios que OMA, utilizando la asignación no ortogonal de recursos [17].
- Baja latencia: En OMA un usuario tiene que enviar una solicitud de programación a la estación base. Este proceso conlleva mucha latencia y costo en la señalización. En cambio, en NOMA no es necesario este procedimiento, permitiendo una reducción significativa de latencia y coste de señalización [3].
- Evolución de las capacidades de procesamiento de los dispositivos: Para que NOMA sea prometedora, debe utilizarse con técnicas avanzadas de transmisión/recepción [14].
- No es necesario el incremento de antenas de transmisión.
- Buena compatibilidad con otras técnicas.
- Gran desempeño de la ganancia en escenarios de alta movilidad [2].

1.4.6 DESAFÍOS EN NOMA

Aunque NOMA proporciona ventajas atractivas, hay que resolver algunos desafíos, como el diseño avanzado del transmisor, la compensación entre rendimiento y la complejidad del receptor.

- Decodificación compleja: La decodificación de señales al usar SIC requiere una implementación compleja adicional comparado con esquemas OMA, por ello el receptor debe decodificar la información de otros usuarios antes de decodificar su propia información. También, esta complejidad aumenta a medida que incrementa el número de usuarios.
- Número limitado de usuarios: Encontrar la señal apropiada y la estrategia de codificación y modulación es un factor importante a considerar [12].
- Complejidad en la asignación de potencia: El rendimiento alcanzable de un usuario se ve afectado por la asignación de potencia de transmisión del mismo usuario y de la misma forma, afecta la capacidad alcanzable de otros usuarios.
- Emparejamiento dinámico de usuarios: la interferencia es fuerte en los sistemas NOMA; es difícil pedir que todos los usuarios del sistema realicen NOMA conjuntamente. Como alternativa, se debe trabajar a la par con otras técnicas como MIMO (*Multiple-input Multiple-output*), con ello los usuarios se dividen en varios grupos en los que se aplica NOMA, y a los diferentes grupos se les asignan recursos de ancho de banda ortogonales [2].
- Asignación de recursos: El emparejamiento de usuarios y la asignación óptima de potencia, requiere un algoritmo sofisticado para proporcionar el mejor rendimiento con el uso de recursos mínimos. La asignación de recursos también puede explorarse desde el punto de vista de la optimización [2].
- Propagación de errores: Cuando se produce un error en el SIC, es probable que el resto de la información del usuario se decodifique de forma errónea. En ese caso, se pueden considerar técnicas de detección no lineal para suprimir la propagación de errores. Asimismo, se puede realizar alguna investigación que proporcione una comprensión matemática del efecto del SIC imperfecto [2].

Las dos operaciones clave que hacen posible NOMA son la codificación de superposición, que debe realizarse en el lado del transmisor y la cancelación sucesiva de interferencias en el receptor.

1.4.7 SC (SUPERPOSITION CODING)

La SC permite transmitir la información de varios usuarios al mismo tiempo. Cabe mencionar, que SC es un esquema no ortogonal reconocido que alcanza la capacidad en un canal de transmisión gaussiano escalar [2].

El usuario que tiene condiciones de canal fuerte (usuario cercano), decodifica inicialmente el mensaje del usuario lejano que posee condiciones de canal más débiles y luego elimina la interferencia del usuario lejano mediante el uso de SIC. La información del usuario lejano se detecta fácilmente considerando todos los demás mensajes como ruido, dado que, ambos usuarios utilizan el mismo bloque de recursos [3].

1.4.8 SIC (SUCCESSIVE INTERFERENCE CANCELLATION)

La cancelación sucesiva de interferencia se basa en la diferencia que existe en la intensidad de las señales de interés. La idea básica de SIC radica en que las señales de usuario se decodifican sucesivamente. Después de decodificar la señal de un usuario, se resta de la señal combinada antes de decodificar la señal del siguiente usuario. Sin embargo, antes del SIC los usuarios se ordenan según la intensidad de su señal para que el receptor pueda decodificar primero la señal más fuerte, restarla de la señal combinada y aislar la más débil [2].

1.4.9 ASIGNACIÓN DE POTENCIA FIJA

La asignación de la potencia de transmisión en NOMA afecta la correcta transmisión de datos, no solamente de un usuario, sino también, de otros usuarios. El mejor desempeño de NOMA puede obviamente ser logrado por la búsqueda exhaustiva de asignaciones dinámicas de potencia. Por ejemplo, en el caso de FSPA (*Full Search Power Allocation*), todas las posibles combinaciones de asignaciones de potencia son consideradas para cada usuario. FSPA resulta, sin embargo, computacionalmente complejo; adicionalmente, el encabezado de señalización asociado con el orden de decodificación SIC y los radios de asignación de potencia aumentan significativamente.

Una variante que permite el ahorro potencial en el encabezado de señalización y simplifica la asignación de potencia, es usar grupos de usuarios predefinidos y una asignación de potencia fija por grupo (FPA), donde los usuarios son divididos en múltiples grupos de acuerdo con la magnitud de sus ganancias de canal usando umbrales predefinidos [15].

En este trabajo se va a considerar una asignación de potencia fija en los usuarios para evaluar el rendimiento que obtiene NOMA-OFDM al variar parámetros tales como la tasa de codificación, esquema de modulación y factor de inyección.

2 METODOLOGÍA

En este apartado se describe el proceso y metodología implementado, para el desarrollo de la simulación del sistema NOMA-OFDM. Como método de investigación se aplicó un enfoque cuantitativo-deductivo, para cumplir con los objetivos previamente establecidos, tras el estudio de la técnica NOMA se realizó mediciones a través de las variables BER y Eb/No, posteriormente se procedió con su análisis; se presentó los resultados de la simulación, empleando tablas resumen de las curvas BER vs Eb/No para cada usuario, de igual modo se ofrece una explicación de la conclusión en el capítulo 3 [18].

Se usa una investigación explicativa por cuanto, en la parte teórica se describió los componentes principales del sistema de comunicación. En lo referente a la simulación se pretende variar los parámetros de modulación (QPSK, 16QAM o 64 QAM), tasa de codificación (1/2, 2/3, 3/4 y 5/6) y factor de inyección para definir las causales y efectos que provocan en el sistema de comunicación. De igual forma se utiliza la investigación de tipo descriptiva puesto que, se detalla la estructura del sistema NOMA a través de un diagrama de bloques, indicando el motivo de cada uno de estos. A continuación, se da una descripción detallada de cada elemento, indicando las opciones de configuración, que se han implementado. Luego, se exponen los criterios por los que se ha optado para evaluar el rendimiento del sistema [19].

Para dichas simulaciones se empleó MATLAB en la versión R2021b, como software de simulación y el *Communications Toolbox* de dicho software. MATLAB integra un conjunto de librerías y comandos de alto nivel, haciéndolo idóneo para trabajar con simulaciones dentro de múltiples ámbitos de la ingeniería pues, ofrece excelentes capacidades gráficas para la representación de datos. El *Communications Toolbox* proporciona algoritmos para el análisis, diseño, simulación y verificación de sistemas de comunicaciones.

2.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN NOMA

Se predefine el esquema del sistema NOMA-OFDM por medio de un diagrama de bloques, para facilitar la implementación en la herramienta MATLAB. A grandes rasgos, se va a combinar dos flujos de datos (capa 1 y capa 2), a la señal de la capa 1 se multiplica por un factor de inyección, permitiendo la transmisión de los dos flujos de datos en el mismo ancho de banda.

Se divide el diseño del sistema en tres partes esenciales: transmisor, canal de comunicación y receptor. Cada una de las partes mencionadas contendrá otros elementos, los cuales se explicarán a continuación, haciendo mención del porqué del uso de cada uno de ellos. Se debe tener en cuenta que el nivel de inyección, definirá la asignación de potencia entre las capas.

2.1.1 PARÁMETROS CONFIGURABLES

La Tabla 2.1 presenta los parámetros que los usuarios pueden seleccionar para la transmisión.

Tabla 2.1. Parámetros de entrada.

Parámetro	Descripción	Valor
k1	Tasa de modulación para usuario uno	1/2, 2/3, 3/4 y 5/6
k2	Tasa de modulación para usuario dos	1/2, 2/3, 3/4 y 5/6
M1	Modulación usuario uno	4 para QPSK, 16 para 16QAM o 64 para 64 QAM
M2	Modulación usuario dos	4 para QPSK, 16 para 16QAM o 64 para 64 QAM
fac_dB	Factor de inyección.	(menor a cero) [dB]

En el Segmento de código 2.1 se muestra los parámetros a configurar de manera independiente para cada usuario.

4	<code>%% Input parameters</code>	
5	<code>iter=3000;</code>	<code>% número de iteraciones</code>
6	<code>M1 = 4;</code>	<code>% modulación usuario 1 (64 para 64QAM, 16 para 16QAM, 4 para QPSK)</code>
7	<code>M2 = 16;</code>	<code>% modulación usuario 2 (64 para 64QAM, 16 para 16QAM, 4 para QPSK)</code>
8	<code>k1 = 3/4;</code>	<code>% tasa de codificación usuario 1 (1/2, 2/3, 3/4, 5/6)</code>
9	<code>k2 = 1/2;</code>	<code>% tasa de codificación usuario 2 (1/2, 2/3, 3/4, 5/6)</code>
10	<code>fac_dB = -10 ;</code>	<code>% factor de inyección en dB (menor a cero)</code>

Segmento de código 2.1. Parámetros configurables de entrada.

2.1.2 PARÁMETROS OFDM

Para la simulación las señales de los dos usuarios, usan formas de onda de capa física, basadas en la estructura de una señal OFDM. Razón por la cual se debe especificar

parámetros como el tamaño de la FFT, la duración del prefijo cíclico, así como la estructura piloto.

Para la configuración del módulo OFDM, se toma como referencia la estructura presentada en el estándar de comunicaciones inalámbricas 802.11p, que corresponde al estándar para comunicaciones inalámbricas en redes vehiculares y ofrece mecanismos de priorización de la información, para permitir una diferenciación de la calidad de servicio entre aplicaciones. IEEE 802.11p cubre la capa física (PHY) y subcapa MAC de la arquitectura WAVE [20]. Para el desarrollo de la simulación se predefine algunos parámetros básicos del sistema OFDM en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros básicos del estándar 802.11p de 10 MHz usando OFDM [20].

Especificaciones	IEEE 802.11p
Número de subportadoras de datos	48
Número de subportadoras piloto	4
Número total de subportadoras	64
Duración del símbolo OFDM	8 μ s
Período FFT	6.4 μ s
Espaciamiento de subportadora	0.15625 MHz
Ancho de Banda	10 MHz
Intervalo de Guarda (GI)	1.6 μ s

Como se observa en la Tabla 2.2 un símbolo OFDM se compone de 64 subportadoras totales: 48 subportadoras de datos, 4 subportadoras piloto y 12 subportadoras DC+null. En el Segmento de código 2.2 un paquete de datos está conformado por 6 símbolos OFDM (5 datos y 1 para preámbulo).

```

16 %% OFDM parameters
17 n_sym=5; % número de símbolos OFDM por paquete
18 Nfft=64; % tamaño fft
19 data_sub=48; % número subportadoras de datos
20 pilot_sub=4; % número subportadoras piloto
21 preamble = [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, 1,1,-1,1,1,1,-1,1, 1,-1,-1,1, 1,1,-1,1, -1,-1,-1,1];
22 pilotos=repmat([1;-1;1;-1],1,n_sym+1);

```

Segmento de código 2.2. Parámetros OFDM.

Las subportadoras pilotos son destinadas para el entrenamiento del sistema y para llevar a cabo la estimación del estado del canal; en este componente del proyecto no se lleva a cabo estas tareas. Las subportadoras nulls se ubican de tal manera que introduzcan una banda de guarda en frecuencia. Las subportadoras de datos contienen la información sobre la tasa de codificación, el tipo de modulación, la longitud de la trama de datos y la información a transmitirse.

2.1.2.1 Generación del preámbulo

El preámbulo está formado por una serie conocida de 1's y 0's. El mismo que está conformado de dos partes: un preámbulo largo y uno corto, como se indica en la Figura 2.1. El preámbulo corto se crea mediante la concatenación de 10 secuencias cortas y el preámbulo largo mediante la concatenación de 2 secuencias largas y su respectivo intervalo de guarda [21].



Figura 2.1. Preámbulo [21].

Un símbolo OFDM está compuesto por subportadoras, como se identifica en la Figura 2.2. Las subportadoras se encuentran enumeradas de este modo: $-26, -25, -24, \dots, -1, 0, 1, \dots, 24, 25, 26$. Los datos modulados se ubican en cada subportadora comenzando en la -26 hasta la 26 ; se omite la subportadora 0 , en la cual se ubica un valor de 0 (DC).

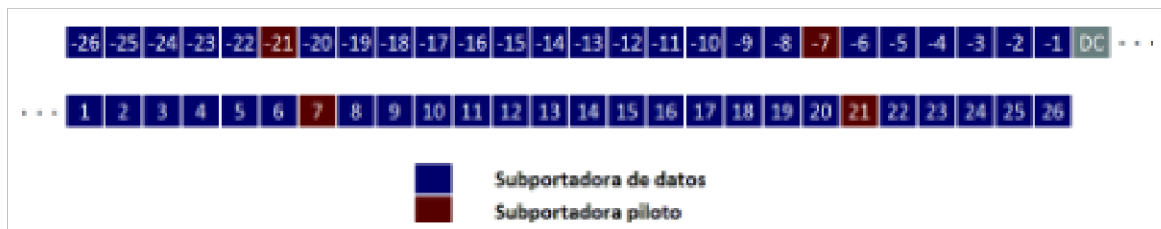


Figura 2.2. Distribución de las subportadoras OFDM [21].

2.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN NOMA-OFDM

La Figura 2.3 presenta el diagrama de bloques del transmisor NOMA. Se identifica los dos usuarios, el que transmite en la capa superior (usuario 1) y el que transmite en la capa inferior (usuario 2). En el diagrama de bloques se da a notar que los flujos de datos de cada usuario se procesan de forma independiente, por sus propios bloques de codificación FEC (*Forward Error Correction*) y modulación. Después, mediante la multiplexación por potencia, se unen los dos flujos de datos en uno solo. Esta última señal se genera como la

superposición de las señales (SC) de los dos usuarios. Posteriormente, a la señal conjunta se le añade el preámbulo y pasa por el bloque del codificador OFDM antes de ser transmitida por el canal AWGN. La ecuación 2.1 representa este proceso.

$$S_{TR} = S_1 + factor (S_2) \quad (2.1)$$

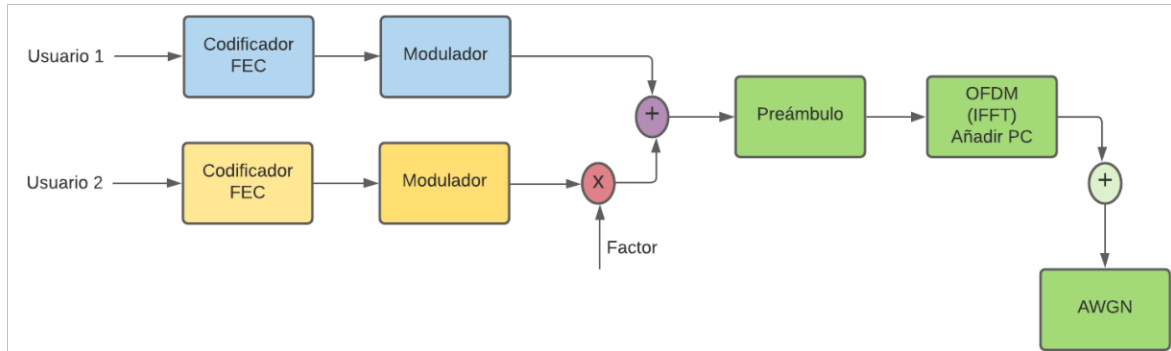


Figura 2.3. Diagrama de bloques del transmisor NOMA.

2.2.1 GENERACIÓN DE DATOS ALEATORIOS

Para generar las dos secuencias pseudoaleatorias de ceros o unos, como se evidencia en el Segmento de código 2.3 se utiliza el comando *randi*, dado esto, los datos se guardan en las variables *data_bit1* y *data_bit2* que dependen del número de símbolos OFDM, del esquema de modulación y de la tasa de codificación que se emplea; los tamaños de las matrices son de num_bits_c1*1 y num_bits_c2*1 .

48	%% TRANSMITTER %%%	
49	data_bit1 = randi([0 1],num_bits_c1,1);	% generador de bits usuario 1
50	data_bit2 = randi([0 1],num_bits_c2,1);	% generador de bits usuario 2

Segmento de código 2.3. Generación de datos aleatorios.

2.2.2 CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL

Un codificador convolucional es un tipo de código corrector de errores caracterizado por la terna (n, m, k) . Donde n es el número de entradas al codificador, m es el número de salidas y k la profundidad del código (las salidas son definidas por la entrada actual y las $k-1$ entradas previas), n y m son enteros ($n < m$). La memoria k debe ser lo suficientemente larga para alcanzar bajas probabilidades de error; pero no tanto, como para requerir demasiado procesamiento en el decodificador. La tasa del código es la relación entre el número de entradas y número de salidas n/m ; esta tasa indica que proporción de los bits

transmitidos son efectivamente información y no tan solo redundancia [22]. Para una comunicación efectiva, es importante proteger la información añadiendo redundancia a la misma, por ende, se añade un codificador convolucional.

La codificación convolucional para los usuarios 1 y 2, se hace mediante las funciones “*conf_cod1*” y “*conf_cod2*”. En MATLAB existe el objeto *comm.ConvolutionalEncoder* que codifica una secuencia de vectores de entrada binarios, para producir una secuencia de vectores de salida binarios, se establece las propiedades del codificador como se indica en el Segmento de Código 2.4 y en el Segmento de Código 2.5.

```
1 function [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(codeRate1,traceBack)
2
3     trellis = poly2trellis(7,[171 133]);
4     %configuracion codificador usuario 1
5     convEncoder1 = comm.ConvolutionalEncoder('TrellisStructure',trellis);
6     vitDecoder1 = comm.ViterbiDecoder('TrellisStructure',trellis, ...
7         'InputFormat','Hard','TracebackDepth',traceBack);
```

Segmento de código 2.4. Creación del codificador convolucional del usuario uno.

```
1 function [convEncoder2,vitDecoder2]=conf_cod2(codeRate2,traceBack)
2
3     trellis = poly2trellis(7,[171 133]);
4     %configuracion codificador usuario 2
5     convEncoder2 = comm.ConvolutionalEncoder('TrellisStructure',trellis);
6     vitDecoder2 = comm.ViterbiDecoder('TrellisStructure',trellis, ...
7         'InputFormat','Hard','TracebackDepth',traceBack);
```

Segmento de código 2.5. Creación del codificador convolucional del usuario dos.

La función *poly2trellis* acepta una descripción polinomial de un codificador convolucional y devuelve la descripción de la estructura Trellis correspondiente [23]. La línea tres del Segmento de Código 2.4 crea una estructura de Trellis, cuya longitud de restricción es 7, la tasa del sistema es 1/2 y especifica el generador de código como un vector de valores octales 171 y 133. Este codificador toma símbolos de un bit como entradas y genera símbolos de 2 bits como salidas. Por ejemplo, si asume palabras de mensaje de 3 bits como entradas, entonces, el codificador generará salidas de palabras de código de 6 bits.

El Segmento de código 2.6 define las funciones *convEncoder1* y *convEncoder2* que corresponde al codificador convolucional, estas funciones generan el diagrama de Trellis,

verifican que la tasa de codificación sea válida, definen el patrón de *puncturing* de acuerdo a la tasa de codificación y por supuesto codifican los datos siguiendo el diagrama de Trellis generado y el patrón de *puncturing* escogido.

```

44     % CONVOLUTIONAL ENCODER AND DECODER
45     [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack);
46     [convEncoder2,vitDecoder2]=conf_cod2(k2,traceBack);

```

Segmento de código 2.6. Codificador y decodificador FEC.

Se realiza la codificación convolucional para cada usuario y se obtiene las variables *dataEnc1* y *dataEnc2*, como detalla el Segmento de código 2.7.

```

51     dataEnc1 = convEncoder1(data_bit1);           % codificación FEC usuario 1
52     dataEnc2 = convEncoder2(data_bit2);         % codificación FEC usuario 2

```

Segmento de código 2.7. Datos codificados.

2.2.2.1 Tasa de codificación

Puncturing es una técnica para conseguir códigos de cualquier tasa de transmisión, sin aumentar la complejidad de la decodificación en la recepción. El codificador por defecto tiene una tasa de codificación de 1/2, para tener una tasa mayor con el mismo codificador se usa el concepto de *puncturing*. Esta técnica omite ciertos bits a la salida del codificador (etapa de codificación), mientras tanto, en la etapa de decodificación se ingresan bits 0's en estos sitios antes de realizar el proceso. Para la fase de decodificación se emplea el algoritmo de Viterbi, que se nombrará en la sección 2.4.3.

El codificador y el decodificador conocen perfectamente cuales bits no se transmiten, porque para eso se usa cierta matriz de *puncturing*, que indica cuales son los bits a removerse para lograr la tasa de codificación anhelada. Por ejemplo, para tener un código de tasa 3/4 a partir de uno de tasa 1/2, el vector de patrón de *puncturing* será [1;1;0;1;1;0]. Los 1's en el vector indican que se transmiten los bits en las posiciones 1, 2, 4 y 5 en tanto que, los 0's denotan que los bits en las posiciones 3 y 6 se eliminan de la señal transmitida. En consecuencia, por el *puncturing* ahora por cada 3 bits de entrada, el código genera 4 bits de salida (a diferencia de los 6 bits producidos antes del *puncturing*). Esto da como resultado un código de tasa 3/4 [22], [24].

Los patrones de *puncturing* para las tasas de codificación de 3/4, 2/3 y 5/6 se señalan en las líneas diez, quince y veinte del Segmento de código 2.8. La tasa de codificación por defecto de 1/2 se muestra en la línea tres del Segmento de código 2.8.

```

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

```

Segmento de código 2.8. Configuración de las tasas de codificación.

2.2.3 MODULACIÓN

La modulación se da cuando la información digital de entrada se transporta usando una señal portadora ya sea en amplitud, frecuencia, fase o una combinación de estas. Mediante las técnicas de modulación, se aprovecha el canal de comunicación y permite aumentar la cantidad de información transmitida de forma simultánea además, fortalece la señal [26].

La modulación digital se divide en dos clases:

- PSK (*Phase Shift Keying*)
- QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): Que cambia la amplitud y fase de la portadora según la modulación/señal digital que representa los datos.

Dependiendo de la agrupación de los bits se tiene $M = 2^m$, donde m indica el número de bits que se agrupan para formar una muestra modulada y M es el nivel, estado u orden de modulación. Cuando el nivel de modulación aumenta se transmite más bits por símbolo,

pero con la desventaja de aumentar la BER, puesto que, los puntos de la constelación estarán más cercanos siendo más difícil para el receptor distinguir entre ellos en presencia del ruido e interferencia, como se observa en la Figura 2.4. A continuación la Tabla 2.3 muestra las modulaciones empleadas en la simulación, se ha optado por modulaciones más robustas (QPSK), como también modulaciones menos robustas (64QAM).

Tabla 2.3. Esquema de modulación.

Esquema	M (nivel)	m (bits por símbolo)
QPSK	4	2
16QAM	16	4
64QAM	64	6

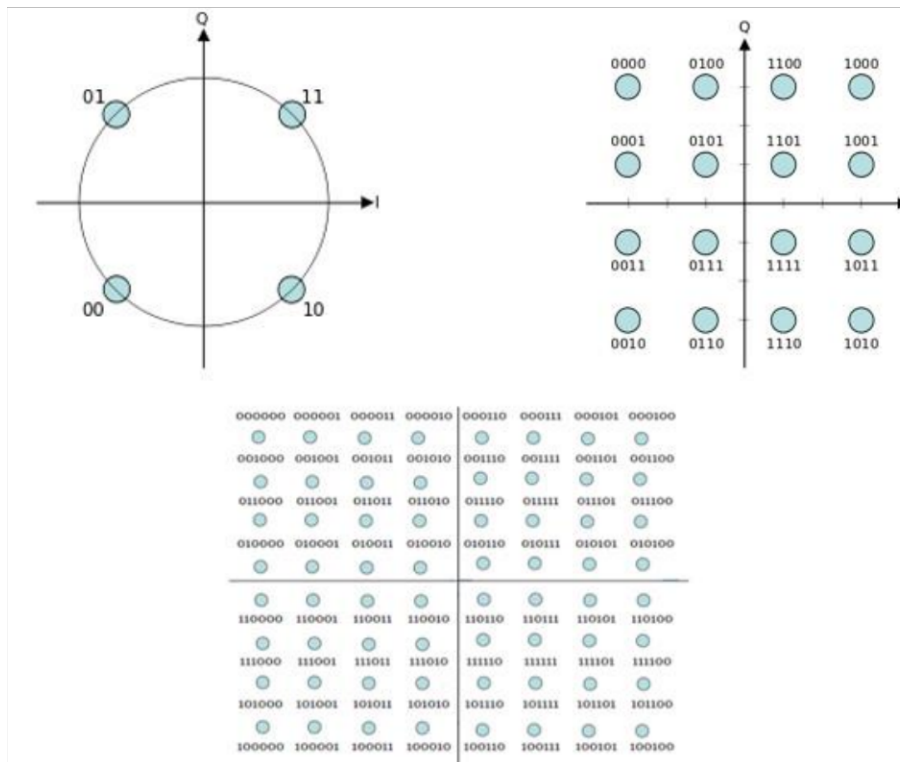


Figura 2.4. Diagrama de constelación QPSK, 16QAM y 64QAM [26].

Los variables binarias *dataEnc1* y *dataEnc2* pasan independientemente a través de un modulador. El modulador toma grupos de m bits y de acuerdo al esquema de modulación seleccionado les asigna un solo valor en el dominio de la frecuencia. Este valor es representado como un punto complejo en el espacio, que forma parte del diagrama de constelación.

Para realizar la modulación se aplica el comando *qammod*. Los argumentos de entrada son: la señal de entrada que será modulada (*dataEnc1* y *dataEnc2*), el orden de la modulación (M1,M2), el argumento '*InputType*' con valor bit que define a la señal de entrada como binaria y el argumento '*UnitAveragePower*' que necesita un escalar lógico '*true*', para que la señal de salida tenga una potencia promedio de 1 vatio, esto significa que se normaliza [27]. En las variables *data_sym1* y *data_sym2* se almacenan las muestras complejas moduladas y normalizadas. El Segmento de código 2.9 indica este procedimiento.

```
53 data_sym1 = qammod(dataEnc1,M1,'InputType','bit','UnitAveragePower',true); % Modulación usuario 1 %normaliza la potencia
54 data_sym2 = qammod(dataEnc2,M2,'InputType','bit','UnitAveragePower',true); % Modulación usuario 2
```

Segmento de código 2.9. Modulación para el usuario uno y dos.

En el Segmento de código 2.10 se observa el cambio del tamaño de las variables *data_sym1* y *data_sym2* usando el comando *reshape*, el arreglo tiene una dimensión de *data_sub*n_sym*, es decir (48*5), estas matrices se almacenan en las variables *data_sym_mat1* y *data_sym_mat2*.

```
55 data_sym_mat1=reshape(data_sym1,data_sub,n_sym);
56 data_sym_mat2=reshape(data_sym2,data_sub,n_sym);
```

Segmento de código 2.10. Conversión a matriz.

2.2.4 SUMA DE SEÑALES E INSERCIÓN DEL FACTOR DE INYECCIÓN

A la salida de cada uno de los bloques del modulador, se tiene la respectiva señal; cada una con su codificación y modulación personalizada. En la variable *data_sym_tot* se guarda la suma de las señales de los dos usuarios a diferente nivel de potencia, pues, al usuario 2 se le multiplica por un factor de inyección quedando una única señal, por cuanto, los usuarios se multiplexaron por potencia, el Segmento de código 2.11 evidencia aquello.

```
57 data_sym_tot=data_sym_mat1+data_sym_mat2*factor;
```

Segmento de código 2.11. Suma de señales e inserción del factor de inyección.

Acto seguido, en el Segmento de código 2.12 se inserta el preámbulo en la variable *data_sym_tot*.

```
58 data_sym_tot=[preambulo',data_sym_tot]; % unir preámbulo y datos
```

Segmento de código 2.12. Inserción del preámbulo.

2.2.5 MODULADOR OFDM

En el Segmento de código 2.13 se crea el modulador OFDM (*OFDM_mod*), valiéndose del objeto *comm.OFDMModulator*, cuyas propiedades se establecen como se indica en la Tabla 2.4.

```
23 %% Modulator OFDM
24 OFDM_mod = comm.OFDMModulator('FFTLength',64, ...
25                               'PilotInputPort',true, ...
26                               'PilotCarrierIndices',[12; 26; 40; 54], ...
27                               'InsertDCNull',true, ...
28                               'CyclicPrefixLength',16, ...
29                               'NumSymbols',n_sym+1);
```

Segmento de código 2.13. Modulador OFDM.

Tabla 2.4. Propiedades del modulador OFDM [28].

Propiedad	Descripción	Valor
FFTLength	Longitud de la FFT o número de subportadoras utilizadas en el proceso de modulación	64
PilotInputPort	Entrada del piloto	True: para asignar las subportadoras individuales para la transmisión y controlar si se definirá valores en las subportadoras piloto.
PilotCarrierIndices	Índices de subportadora piloto	[12; 26; 40; 54] valor por defecto
InsertDCNull	Opción para insertar DC nulo	True
CyclicPrefixLength	Especifica la longitud del prefijo cíclico	16 (1/4 del número de subportadoras)
NumSymbols	Número de símbolos OFDM	6 símbolos (5 datos y 1 preámbulo)

A continuación, en el Segmento de código 2.14 se aplica la modulación OFDM a la señal *data_sym_tot*, para finalmente devolver la variable *txSig*, la cual tiene los datos modulados en OFDM. La variable *OFDM_mod* permite realizar todo el procesamiento de OFDM, es decir: (IFFT, inserta las subportadoras piloto, conversión paralela serial e inserta el prefijo

cíclico). En la salida del transmisor se tiene una señal, que gracias a la técnica SC contiene los datos de los dos usuarios y se transmite en un único canal.

```
59 txSig = step(OFDM_mod,data_sym_tot,pilotos); % OFDM (IFFT,Añadir PC)
```

Segmento de código 2.14. Uso del modulador OFDM.

2.3 CANAL AWGN

El canal de comunicación es el medio físico usado para enviar la señal desde el transmisor al receptor. Se tiene un canal AWGN para la simulación, ya que, este es suficiente para lograr el objetivo del proyecto. Este canal es un canal ideal, en el cual se asume una fuente de ruido blanco, posee una densidad espectral de potencia constante sobre todo el ancho de banda y una amplitud de distribución gaussiana. Pese a ser el menos realista en comparación con canales como LOS (*Line Of Sight*) o NLOS (*Non Line Of Sight*), un canal AWGN es esencial pues, brinda una percepción de cuál sería el mejor rendimiento del sistema sin la presencia de multitrayectoria. El Segmento de código 2.15 muestra la adición del ruido a la señal *txSig* con parámetros de entrada de SNR en dB y la propiedad '*measured*', que mide el nivel de la señal antes de la adición del ruido, con ello se determina el nivel de ruido adecuado en función del valor de la SNR.

```
61 %%%%%%%%% CHANNEL %%%%%%%%%
62 rxSig=awgn(txSig,SNR_dB(i),'measured'); % ruido AWGN
```

Segmento de código 2.15. Canal AWGN.

2.4 SISTEMA DE RECEPCIÓN NOMA

Se procede a presentar el diagrama de bloques del receptor NOMA. Se presume que la técnica SIC es ideal (SIC toma decisiones perfectas). Para recuperar la información de los dos usuarios, el receptor lo hace en dos grandes etapas. En los dos bloques se trabaja con la señal *rxSig*. En la Figura 2.5 el receptor realiza la recuperación de la señal del usuario uno. La Figura 2.6 ilustra que el receptor primero lleva a cabo la “estimación de la señal del usuario uno”, posteriormente la resta de la señal combinada recibida (S_{TR}), y así logra recuperar la información del usuario dos. El uso de NOMA con SIC aprovecha la diferencia de potencia entre los usuarios, debido al factor de inyección.

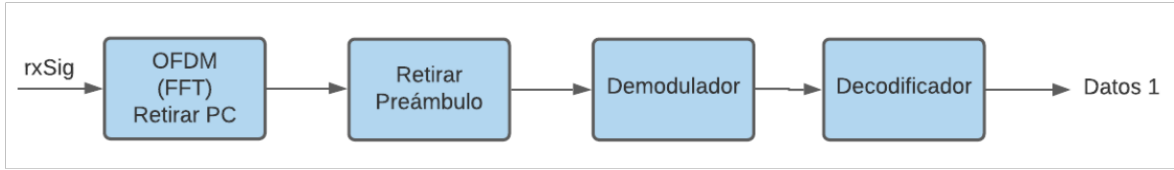


Figura 2.5. Diagrama de bloques del sistema de recepción NOMA del usuario 1.

Se procede a explicar la Figura 2.5 mediante ecuaciones del siguiente modo: de la etapa del transmisor se obtiene la Ecuación 2.2; S_{TR} es la señal combinada recibida. A continuación, se despeja S_1 obteniendo la Ecuación 2.3. Por consiguiente, recuperar la información del usuario uno resulta simple, debido a que, el receptor considera la información del usuario dos como ruido.

$$S_{TR} = S_1 + factor(S_2) + ruido \quad (2.2)$$

$$S_1 = S_{TR} - factor(S_2) - ruido \quad (2.3)$$

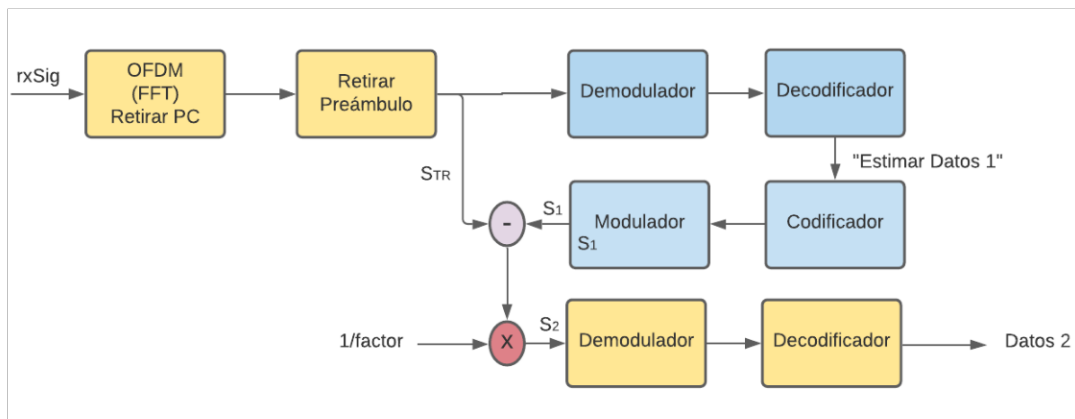


Figura 2.6. Diagrama de bloques del sistema de recepción NOMA del usuario 2.

Se explica la Figura 2.6 por medio de ecuaciones de la siguiente forma: del transmisor se obtiene la Ecuación 2.4 en donde no se considera el ruido. Se despeja S_2 , obteniendo la Ecuación 2.5. En consecuencia, la recuperación de la información del usuario dos es un tanto compleja, dado que el receptor debe primero recuperar la información del usuario uno, para luego recuperar la información del usuario dos.

$$S_{TR} = S_1 + factor(S_2) + ruido \quad (2.4)$$

$$S_2 = \frac{S_{TR} - S_1}{factor} \quad (2.5)$$

El funcionamiento en el receptor se asemeja al del transmisor, pero al inverso, debido a ello la descripción de ciertos bloques no será extensa, en vista que el detalle se realizó en la sección 2.2.

2.4.1 USUARIO UNO

En síntesis, para recuperar la señal del usuario uno, basta con seguir el orden de los bloques de la Figura 2.5, pues la señal del usuario dos se considera como ruido o interferencia adicional.

2.4.1.1 Demodulador OFDM

Se crea el demodulador OFDM (*OFDM_demod*), valiéndose del objeto *comm.OFDMDemodulator*, tal y como se puede apreciar *OFDM_demod* es la función recíproca usada en la transmisión *OFDM_mod*. La variable *OFDM_demod* retira el prefijo cíclico, realiza la conversión serial paralelo, la FFT y extrae del símbolo OFDM demodulado los pilotos de frecuencia. En la línea sesenta y seis del Segmento de código 2.16 se tiene la variable *rx_data_mat1*, que corresponde a la decodificación de la señal *rxSig*.

```
65 | % USER 1
66 | rx_data_mat1= step(OFDM_demod,rxSig); % OFDM (FFT,retira PC)
```

Segmento de código 2.16. Demodulador OFDM .

Acto seguido, como muestra el Segmento de código 2.17, se retira el preámbulo de la variable *rx_data_mat1*.

```
67 | rx_data_sinp1=rx_data_mat1(:,2:end); % Retiro del preámbulo
```

Segmento de código 2.17. Retiro del preámbulo.

2.4.1.2 Demodulador

En el Segmento de código 2.18 se demodula la señal *rx_data1*, usando el comando *qamdemod*, el cual especifica el orden de los símbolos para la demodulación y establece el tipo de señal de salida en bits.

```
69 | rx_bit1 = qamdemod(rx_data1,M1,'OutputType','bit','UnitAveragePower',true); % Demodulación
```

Segmento de código 2.18. Demodulación usuario 1.

2.4.1.3 Decodificador

La decodificación Viterbi se trata de un algoritmo de máxima verosimilitud para códigos convolucionales. Esto quiere decir, que la salida del decodificador siempre será la palabra de código que maximice la función log-similitud [22].

La decodificación convolucional para el usuario uno se realiza mediante la variable *vitDecoder1*, esta se define mediante el objeto *comm.ViterbiDecoder*. La variable *vitDecoder1* depende de los valores de la tasa de transmisión y de la variable *traceBack*. En la simulación, la profundidad de rastreo está definida por *traceBack*, cuyo valor está fijado en 32, siendo suficiente para que el decodificador resuelva posibles ambigüedades que pueden introducirse por los vectores de *puncturing*. En el Segmento de código 2.19, se decodifica la señal *rx_bit1*.

```
70 rx_bit_dec1 = vitDecoder1(rx_bit1); % Decodificación FEC
```

Segmento de código 2.19. Decodificación usuario 1.

2.4.2 USUARIO DOS

La recuperación de la señal del usuario dos es un proceso más complejo, que utiliza la técnica de cancelación (SIC). A grandes rasgos, esta técnica consiste en estimar los datos del usuario uno, cancelarla de la señal recibida (*rx_data2*) y así poder comenzar con la decodificación de la señal del usuario dos. Uno de los retos a mencionar de este proceso, es la recuperación exitosa de la señal del usuario dos, para lo cual primero se recupera la señal del usuario uno y después se cancela de la señal recibida [25].

2.4.2.1 Demodulador OFDM

Se realiza el mismo proceso que el descrito en el apartado 2.4.1. En la línea setenta y seis del Segmento de código 2.20, se tiene la variable *rx_data_mat2* que corresponde a la decodificación de la señal *rxSig*.

```
75 %USER 2  
76 rx_data_mat2= step(OFDM_demod,rxSig); % OFDM (FFT,retira PC)
```

Segmento de código 2.20. Demodulador OFDM.

Acto seguido, como muestra el Segmento de código 2.21 se retira el preámbulo de la variable *rx_data_mat2*.

```
77 rx_data_sinp2=rx_data_mat2(:,2:end); % se retira el preámbulo
```

Segmento de código 2.21. Retiro del preámbulo.

2.4.2.2 Demodulador y Decodificador

Para tener la información del usuario dos, después de pasar por el bloque del demodulador OFDM, se debe realizar la “estimación de los datos uno” por ello, la señal pasa por un proceso de demodulación y decodificación como indica el Segmento de código 2.22.

En la línea de código ochenta la variable “*rx_bit1*” ejecuta la demodulación de la señal *rx_data2*; a continuación, en la línea ochenta y uno se tiene la variable “*rx_bit_dec1*” en la cual se realiza la decodificación FEC de la señal *rx_bit1*.

```
79 [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack); % se define el codificador
80 rx_bit1 = qamdemod(rx_data2,M1,'OutputType','bit','UnitAveragePower',true); % Demodulación
81 rx_bit_dec1 = vitDecoder1(rx_bit1); % Decodificación FEC
```

Segmento de código 2.22. Demodulación y Decodificación para “estimar datos 1”.

2.4.2.3 Codificador y Modulador

Una vez hecha la “estimación de los datos uno” se debe realizar un proceso de “regeneración”, la cual se consigue pasando por el mismo proceso que en el transmisor, es decir, se debe codificar y después modular. Con ello se obtiene una secuencia de bits referentes a los datos del usuario uno (*sig_tx_1*), como se aprecia en el Segmento de código 2.23.

La variable “*rx_bit_cod1*” de la línea de código ochenta y tres efectúa la codificación de la señal *rx_bit_dec1*; a continuación, en la línea ochenta y cuatro se tiene la variable “*sig_tx_1*” que realiza la modulación de la señal *rx_bt_cod1*.

```
82 [convEncoder1,vitDecoder1]=conf_cod1(k1,traceBack); %% se define el codificador
83 rx_bit_cod1 = convEncoder1([rx_bit_dec1(traceBack+1:end);zeros(traceBack,1)]); % Codificación FEC
84 sig_tx_1 = qammod(rx_bit_cod1,M1,'InputType','bit','UnitAveragePower',true); % Modulación
```

Segmento de código 2.23. Codificación y Modulación.

Todo el proceso de “estimación” y “regeneración” implica un incremento en la complejidad del receptor, pero es necesario para proporcionar símbolos confiables del usuario uno.

2.4.2.4 Resta de señales y retiro del factor de inyección

Para acceder a la información del usuario dos, es indispensable restar la señal que ha llegado al receptor (*rx_data2*) y la señal “regenerada” del usuario uno (*sig_tx_1*), posteriormente, dividir por el nivel de inyección al que fue transmitido en primer lugar, como se evidencia en el Segmento de código 2.24.

```
85 sig_tx_2=(rx_data2-sig_tx_1)./factor; % resta de señales
```

Segmento de código 2.24. Resta de señales y retiro del factor de inyección.

2.4.2.5 Demodulador y Decodificador

Por último, la variable *sig_tx_2* pasa por un proceso de demodulación y decodificación, para obtener los datos del usuario dos. Dicho proceso se plasma en el Segmento de código 2.25.

```
86 rx_bit2 = qamdemod(sig_tx_2,M2,'OutputType','bit','UnitAveragePower',true); % Demodulación
87 rx_bit_dec2 = vitDecoder2(rx_bit2); % Decodificación FEC
```

Segmento de código 2.25. Demodulación y Decodificación.

2.5 GENERACIÓN DEL NOMBRE DEL ARCHIVO

El Segmento de código 2.26 muestra cómo asignar el nombre del archivo que contiene todas las variables necesarias para mostrar y graficar los resultados. El archivo generado toma por nombre DATA y el detalle de los parámetros, tiene extensión .mat, como se refleja en la Figura 2.7. Con esta opción cada archivo se guarda con un nombre específico, evitando la sobrescritura y por ende evitando perder las simulaciones.

El comando *save* guarda las variables que se desee y las podrá cargar cuando se requiera en el espacio de trabajo con el comando *load*.

```

97 %% File_name
98 [fac,mod1,tasa1,mod2,tasa2]=fDATA(fac_dB,M1,k1,M2,k2);
99
100 nombre=['DATA','_factor',fac,'_USER1','_Mod-',mod1,'_Cod-',tasa1,'_USER2','_Mod-',mod2,'_Cod-',tasa2,'.mat'];
101
102 save(nombre,'BER1','BER2','EbNo_dB','fac_dB','iter','k1','k2','M1','M2','SNR_dB',...
103 'convEncoder1','convEncoder2','data_bit1','data_bit2','data_sub','data_sym1','data_sym2', ...
104 'data_sym_mat1','data_sym_mat2','data_sym_tot','dataEnc1','dataEnc2','n_sym','Nfft',...
105 'num_bits_c1','num_bits_c2','OFDM_demod','OFDM_mod','pilot_sub','pilotos','preambulo',...
106 'rx_bit1','rx_bit2','rx_bit_cod1','rx_bit_dec1','rx_bit_dec2','rx_data1','rx_data2',...
107 'rx_data_mat1','rx_data_mat2','rx_data_sinp1','rx_data_sinp2','rxSig','sig_tx_1',...
108 'sig_tx_2','txSig','vitDecoder1','vitDecoder2','-mat');

```

Segmento de código 2.26. Generación del nombre del archivo.

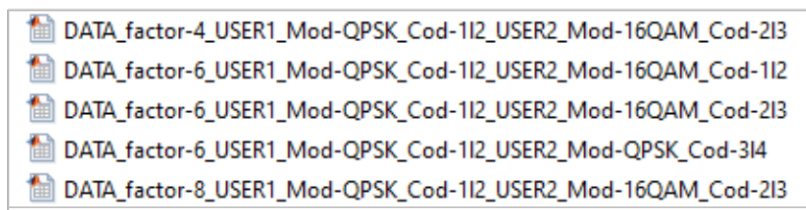


Figura 2.7. Archivos .mat.

2.6 PARÁMETROS INVOLUCRADOS PARA LA MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO

Para establecer la calidad de un sistema de comunicación, es necesario tener parámetros objetivos que puedan ser medidos y expresen de una forma cuantificable aspectos relacionados con la calidad y el rendimiento. La calidad de una comunicación inalámbrica se manifiesta, por ejemplo, en la integridad de los datos transmitidos, en el tiempo en que tardan en llegar al receptor, etc. A continuación, se revisa brevemente algunos de estos parámetros.

- **SNR**

Es la relación que existe entre la potencia de la señal que se transmite (P_S) y la potencia promedio del ruido (P_r), como se muestra en la Ecuación 2.6. Se mide en decibelios, indicando en que cantidad la señal deseada excede el nivel de ruido. Por lo tanto, establece la calidad del sistema; mientras más alto sea el valor de SNR mejor será la calidad del sistema.

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_S}{P_r} \quad (2.6)$$

- **E_b/N_o**

E_b/N_o manifiesta la relación de la energía de la señal por bit y la densidad de potencia del ruido por Hertz. Se emplea para determinar las tasas de datos digitales y las tasas de error. Si el valor de E_b/N_o aumenta el sistema será mejor en términos de la BER. A mayor velocidad de transmisión las condiciones son más desfavorables, es decir, existirá una mayor cantidad de bits errados en consecuencia la BER incrementará.

La relación $\frac{E_b}{N_o} = \frac{\text{energía por bit}}{\text{densidad espectral de potencia de ruido}}$ se expresa en la Ecuación 2.7 en donde: P_s es la potencia de un bit ; T_b es el tiempo de bit ; K es la constante de Boltzmann; T corresponde a la temperatura absoluta expresada en grados Kelvin y finalmente V_{tx} es la velocidad de transmisión.

$$\frac{E_b}{N_o_{dB}} = \frac{P_s T_b}{K T} = \frac{P_s}{K T V_{tx}} \quad (2.7)$$

- **BER**

La BER corresponde a la relación entre el número de bits errados y el número total de bits transmitidos. Esta relación puede ser expresada de forma adimensional, mediante la Ecuación 2.8 o en decibelios mediante la Ecuación 2.9. Para evaluar el número de bits errados se hace una comparación de los bits que ingresan al transmisor con los bits a la salida del receptor. La BER indica la integridad de los bits recibidos, al saber la proporción de los bits que se han recibido exitosamente, y la proporción que no. Un sistema de comunicación es diseñado tomando en cuenta la minimización de la BER esperada.

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número total de bits enviados}} = \frac{b_{errados}}{b_{totales}} \quad (2.8)$$

$$BER_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{b_{errados}}{b_{totales}} \right) \quad (2.9)$$

2.7 CÁLCULO DE ERRORES

Se usa el comando *biterr* del *Communications Toolbox* para calcular el número de bits erróneos del usuario uno y dos, permitiendo después realizar el cálculo de la BER. Aquí se compara los bits transmitidos con los elementos binarios recibidos, los cuales se van a ir acumulando. La función devuelve el número de bits que difieren en la comparación y la relación entre ese número total de bits. Posteriormente se estima la BER, como se ilustra en los Segmentos de código 2.27 a 2.29.

71	<code>% Bits in errors user 1</code>	
72	<code>[number1, ratio1] = biterr(data_bit1(1:end-traceBack), rx_bit_dec1((traceBack+1:end)));</code>	
73	<code>BER1i(i)=BER1i(i)+ratio1;</code>	<code>% BER acumulativo usuario 1</code>

Segmento de código 2.27. Bits erróneos en el usuario uno.

88	<code>% Bits in errors user 2</code>	
89	<code>[number2, ratio2] = biterr(data_bit2(1:end-2*traceBack), rx_bit_dec2((traceBack+1:end-traceBack)));</code>	
90	<code>BER2i(i)=BER2i(i)+ratio2;</code>	<code>%BER acumulativo usuario 2</code>

Segmento de código 2.28. Bits erróneos en el usuario dos.

92	<code>%% BER</code>
93	<code>BER1i(i)=BER1i(i)/iter;</code>
94	<code>BER2i(i)=BER2i(i)/iter;</code>

Segmento de código 2.29. Cálculo de la BER.

La relación entre la SNR y E_b/N_0 está dada por la Ecuación 2.10.

$$SNR_{dB} = \frac{E_b}{N_{o\ dB}} + 10 \cdot \log(n) \quad (2.10)$$

Donde n es el número de bits por subportadora y es igual a $n = \frac{1}{k \cdot m \cdot vt}$; k es la tasa de codificación, m es el orden de la modulación y vt es la relación entre el número de subportadoras de datos y pilotos, dividido por el número de subportadoras totales, es decir:

$$vt = \frac{48+4}{64} = \frac{52}{64}$$

De la Ecuación 2.10 expresada en dB, hay que expresarla en veces como muestra la Ecuación 2.11.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{SNR}{n} \quad (2.11)$$

Para el cálculo total de E_b/N_0 se considera tanto el usuario uno como el usuario dos, como indica la Ecuación 2.12.

$$\frac{E_b}{N_{o\ Total}} = \frac{E_b}{N_{o1}} + \frac{E_b}{N_{o2}} \quad (2.12)$$

La Ecuación 2.11 se reemplaza en la Ecuación 2.12, se considera que la señal del usuario dos se multiplica por el factor de inyección, que representa la potencia añadida a la señal como se observa en la Ecuación 2.13.

$$\frac{E_b}{N_{oTotal}} = \frac{SNR}{n} + \frac{factor^2 \cdot SNR}{n} \quad (2.13)$$

$$\frac{E_b}{N_{oTotal}} = SNR \cdot \left(\frac{1}{k_1 \cdot m_1 \cdot vt} + \frac{factor^2}{k_2 \cdot m_2 \cdot vt} \right) \quad (2.14)$$

A la Ecuación 2.14 se expresa en dB, obteniendo así la Ecuación 2.15 que se implementa en el código de la simulación [29].

$$\frac{E_b}{N_{oTotal_{dB}}} = SNR_{dB} + 10 \log \left(\frac{1}{k_1 \cdot m_1 \cdot vt} + \frac{factor^2}{k_2 \cdot m_2 \cdot vt} \right) \quad (2.15)$$

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta y analiza los resultados de las curvas Eb/No vs BER de la simulación del sistema NOMA-OFDM, con las diferentes configuraciones que se hacen en los parámetros para cada usuario (modulación, tasa de codificación y factor de inyección). Con el respaldo de las gráficas presentadas se puede comprobar el funcionamiento del sistema y su complejidad frente al análisis teórico.

El número de iteraciones en el sistema se configuró en 7000, con el fin de obtener curvas con trazos definidos. El canal inalámbrico usado es AWGN. En el sistema se asume sincronización perfecta entre transmisor y receptor.

En todas las simulaciones se mantiene parámetros fijos, los mismos que se encuentran especificados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros fijos en todas las simulaciones.

Variables	Descripción	Valor
iter	Número de iteraciones	7000
n_sym	Número de símbolos OFDM por paquete	5
Nfft	FFT (subportadoras totales)	64
data_sub	Número de subportadoras de datos	48
pilot_sub	Número de subportadoras piloto	4
CyclicPrefixLength	Longitud del prefijo cíclico	16
PilotCarrierIndices	Índices de subportadora piloto	[12; 26; 40; 54]
NumSymbols	Número total de símbolos	6
traceBack	Profundidad de rastreo del codificador FEC	32
EbNo_dB	Intervalo de simulación Eb/No	0:2:40
Channel	Canal inalámbrico	AWGN

3.1 RESULTADOS

Para realizar el análisis de cada escenario de estudio por separado, se varía algunos de los parámetros de la simulación y otros se fijan, para así realizar una adecuada comparativa y explicar cómo influyen estos y el impacto que tienen en el sistema. Las variables y su descripción se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros configurables en las simulaciones.

Variables	Descripción	Valor
fac_dB	Factor de inyección en dB	Valores menores a 0
M1	Modulación usuario 1	4 para QPSK 16 para 16QAM 64 para 64QAM
k1	Tasa de codificación usuario 1	1/2, 2/3, 3/4, 5/6
M2	Modulación usuario 2	4 para QPSK 16 para 16QAM 64 para 64QAM
k2	Tasa de codificación usuario 2	1/2, 2/3, 3/4, 5/6

3.1.1 IMPACTO DEL FACTOR DE INYECCIÓN

En la Figura 3.1 se presentan las curvas de BER vs E_b/N_0 generadas por la simulación del sistema. Las configuraciones para el usuario uno y dos, que se mantienen fijas a lo largo de este escenario de estudio (impacto del factor de inyección), son las siguientes: $M1=4$; $M2=16$; $k1=2/3$; $k2=1/2$. La figura es analizada con tres diferentes valores de factor de inyección.

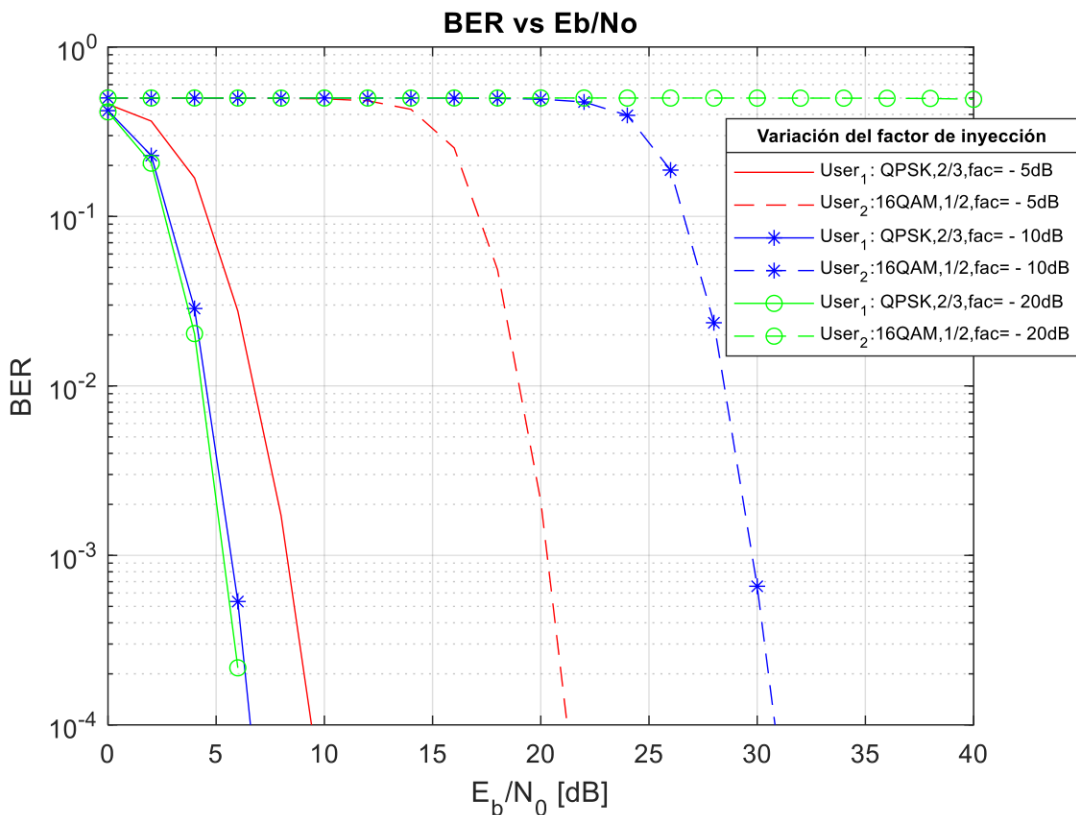


Figura 3.1. BER vs E_b/N_0 con $M1=4$, $k1=2/3$; $M2=16$, $k2=1/2$ y $fac_dB = -5, -10, -20$.

En la Figura 3.1 se observa la simulación con tres diferentes valores de factor de inyección (fac_dB = -5; fac_dB = -10; fac_dB = -20). Con un factor de -20 dB no se logra obtener un buen BER para el usuario dos, debido a que al tener un factor de -20 dB la señal se encuentra muy atenuada, por esta razón es comparable al ruido y el número de bits errados es demasiado alto.

Gracias a la Tabla 3.3 se deduce que el factor de -5dB presenta el mejor de los resultados, ya que con este factor para obtener un BER de 10^{-4} se tiene un Eb/No de 9.431 dB para el usuario uno y 21.233 dB para el usuario dos, obteniendo así una menor diferencia de Eb/No (11.802 dB) en relación con las otras curvas. Debido a ello, se analizó más simulaciones que estén cercanas al valor de un factor de inyección de -5 dB, para determinar finalmente el valor del factor de inyección que arroje el mejor rendimiento para el sistema.

Tabla 3.3. Valores de la relación Eb/No para usuario uno y dos (fac_dB= -5; -10; -20).

Factor de inyección [dB]	BER	Eb/No [dB]		Diferencia [dB]
		Usuario 1	Usuario 2	
-5	10^{-3}	8.292	20.322	12.03
	10^{-4}	9.431	21.233	11.802
-10	10^{-3}	5.711	29.772	24.061
	10^{-4}	6.584	30.834	24.25
-20	10^{-3}	5.408	-	-
	10^{-4}	6.356	-	-

En base a los resultados obtenidos en la Figura 3.1 ahora se presentan las curvas de BER vs Eb/No en la Figura 3.2, como en el caso anterior las configuraciones que se mantienen fijas son las siguientes: M1=4; M2=16; k1=2/3; k2=1/2. La figura es analizada con tres diferentes valores de factor de inyección (fac_dB = -2; fac_dB = -4; fac_dB = -6).

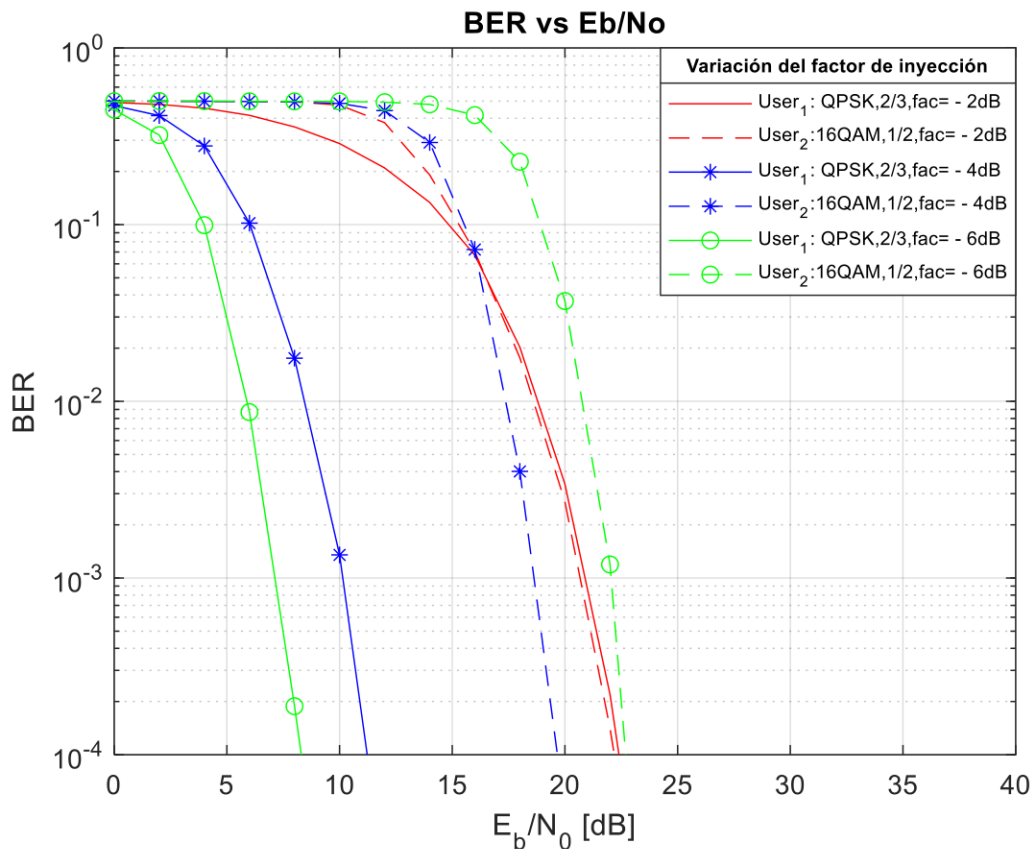


Figura 3.2. BER vs E_b/N_0 con $M_1=4$, $k_1=2/3$; $M_2=16$, $k_2=1/2$ y $fac_dB = -2, -4, -6$.

En la Figura 3.2 se ilustra la simulación con tres diferentes valores de factor de inyección ($fac_dB = -2$; $fac_dB = -4$; $fac_dB = -6$). En la Tabla 3.4 se contempla que con un factor de -6 dB para obtener un BER de 10^{-4} se tiene un E_b/N_0 de 8.289 dB para el usuario uno y 22.711 dB para el usuario dos, obteniendo una diferencia de E_b/N_0 de 14.422 dB; por otra parte con el factor de -4 dB para alcanzar un BER de 10^{-4} se obtuvo un E_b/N_0 de 11.231 dB para el usuario uno y 19.679 dB para el usuario dos, dando una diferencia de E_b/N_0 de 8.448 dB; finalmente con el factor de -2 dB para lograr un BER de 10^{-4} se tiene un E_b/N_0 de 22.402 dB para el usuario uno y 22.213 dB para el usuario dos, consiguiendo una diferencia de E_b/N_0 de -0.189 dB, ya que el usuario dos posee un valor menor de E_b/N_0 que el usuario uno; por este motivo, se infiere que el factor de -4 dB presenta el mejor rendimiento para el sistema, pues la diferencia del E_b/N_0 es pequeña.

Tabla 3.4. Valores de la relación Eb/No para usuario uno y dos (fac_dB= -2; -4; -6).

Factor de inyección [dB]	BER	Eb/No [dB]		Diferencia [dB]
		Usuario 1	Usuario 2	
-2	10 ⁻³	20.932	20.718	-0.214
	10 ⁻⁴	22.402	22.213	-0.189
-4	10 ⁻³	10.163	18.631	8.468
	10 ⁻⁴	11.231	19.679	8.448
-6	10 ⁻³	7.128	22.071	14.943
	10 ⁻⁴	8.289	22.711	14.422

Con ayuda de la Tabla 3.5 se realizará una conclusión global del escenario de estudio (impacto del factor de inyección).

Tabla 3.5. Tabla resumen de valores de la relación Eb/No para un BER de 10⁻⁴.

Factor de inyección [dB]	Eb/No [dB]		Diferencia [dB]
	Usuario 1	Usuario 2	
-2	22.402	22.213	-0.189
-4	11.231	19.679	8.448
-5	9.393	21.195	11.802
-6	8.289	22.711	14.422
-10	6.584	30.834	24.25
-20	6.356	-	-

El factor de inyección define la asignación de potencia entre los dos usuarios. Esta variable se manipula con la finalidad de controlar el impacto de la interferencia generada por el usuario dos. Se recalca que el usuario dos actúa como interferencia sobre el usuario uno.

Al usar un factor de inyección de -2 dB la curva del usuario uno, está alejada del eje “y” (curva a la derecha) y conforme se disminuye el valor del factor de inyección en dB, la curva se acerca al eje “y” (curva a la izquierda). Con el mismo factor de inyección de -2 dB, la curva para el usuario dos también tiende a alejarse del eje “y” (curva a la derecha) y al disminuir el valor del factor de inyección la curva se acerca al eje “y”, pero después vuelve a alejarse del eje “y”.

Para el usuario uno los valores de Eb/No tienen un mayor cambio, mientras que para el usuario dos, este cambio no es muy abrupto. Debido a que el usuario uno está afectado

por el usuario dos como un “ruido interferente”; y el usuario dos presenta una afectación por la reducción de su señal de potencia. Por lo tanto, el mecanismo de asignación del factor de inyección (potencia para los usuarios) es fundamental para NOMA.

Al aplicar un valor de factor de inyección en dB muy cercano a cero ($\text{fac_dB} = -2$), se observa que la atenuación de la señal del usuario dos es poca, de manera que la interferencia por parte del usuario dos se incrementa significativamente, y el usuario uno se ve afectado degradando su señal, por lo cual la curva del usuario uno se encuentra más a la derecha en comparación con la curva del usuario dos. Debido a la gran interferencia sobre el usuario uno, la integridad de los bits recibidos se ve afectado; y finalmente el receptor no puede cumplir exitosamente la tarea de recuperar la información del usuario dos, ya que depende de los datos del usuario uno y esta última no es una señal exacta pues, presenta demasiados errores. Esto se evidencia en la Figura 3.2 por cuanto ambas curvas se encuentran desplazadas a la derecha.

Al aplicar valores pequeños en dB de factor de inyección ($\text{fac_dB} = -6; -8; -10 \dots$), se observa que la señal del usuario dos se atenúa cada vez más, es decir, en el usuario dos se reduce la potencia de la señal, pues se multiplica la señal por un valor muy pequeño. En consecuencia, con valores cada vez más pequeños de factor de inyección, el usuario dos sufre y es quien se ve afectado por este cambio, y la tarea de recuperar su información se complica cada vez, por ende, su señal llega a ser muy pequeña comparada al ruido.

Con todo lo anterior, se observa que al escoger un factor de inyección de -4 dB alcanza un adecuado BER para ambos usuarios; obteniendo el mejor rendimiento para este esquema. El valor del factor de inyección óptimo de un sistema NOMA cambiará levemente, al variar los esquemas de modulación y tasa de codificación.

3.1.2 IMPACTO DE LA MODULACIÓN

3.1.2.1 Usuario uno

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones, para diferentes esquemas de modulación del usuario uno. La Figura 3.3 muestra las curvas de BER vs E_b/N_0 generadas por la simulación del sistema. Las configuraciones para el usuario uno y dos, que se mantienen fijas para este escenario de estudio (impacto de la modulación del usuario uno), son las siguientes: $k_1 = 2/3$; $M_2 = 16$; $k_2 = 1/2$; $\text{fac_dB} = -6$. La figura es analizada con tres diferentes esquemas de modulación para el usuario uno ($M_1 = 4$; $M_1 = 16$; $M_1 = 64$).

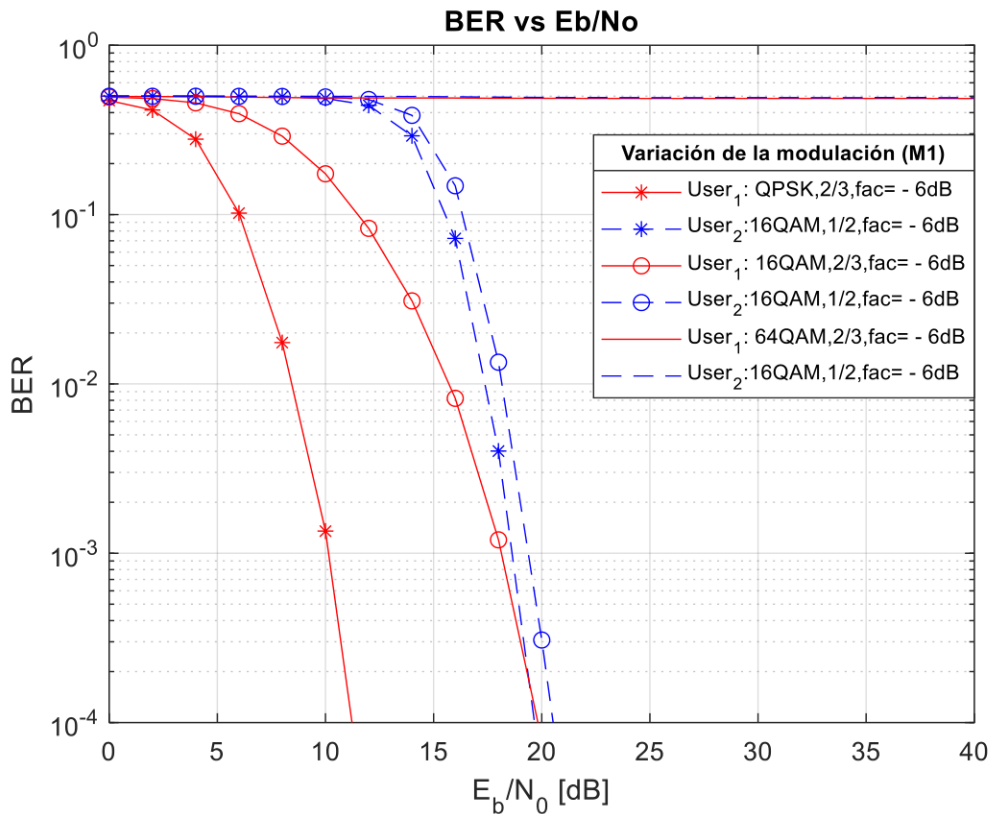


Figura 3.3. BER vs E_b/N_0 con $k_1=2/3$; $M_2=16$, $k_2=1/2$; $fac_{dB} = -6$ y $M_1=$ QPSK, 16QAM, 64QAM.

En la Figura 3.3 se observa la simulación con tres diferentes esquemas de modulación para el usuario uno ($M_1 = 4$; $M_1 = 16$; $M_1 = 64$). Con una modulación $M_1 = 64$ en efecto no se logra obtener un buen BER para ninguno de los usuarios, debido que al tener la modulación menos robusta (64QAM) se tiene una mayor probabilidad de error y el receptor es incapaz de recuperar la información de los usuarios. Por otro lado, con una modulación $M_1 = 16$ para alcanzar un BER de 10^{-4} se obtiene un E_b/N_0 de 19.829 dB para el usuario uno y 20.512 dB para el usuario dos, logrando una diferencia de E_b/N_0 igual a 0.683 dB. Por último, al aplicar la modulación $M_1 = 4$ para obtener un BER de 10^{-4} se tiene un E_b/N_0 de 11.255 dB para el usuario uno y 19.642 dB para el usuario dos obteniendo una diferencia de E_b/N_0 igual a 8.387 dB. Empleando la Tabla 3.6 se puede inferir que con una modulación $M_1 = 16$ QAM se tiene la menor diferencia de E_b/N_0 ; por su parte con la modulación $M_1 = 4$ QPSK se obtiene una diferencia de E_b/N_0 aceptable, pero se observa que las curvas de la gráfica del usuario uno y dos están más cercanas al eje "y" (curvas a la izquierda).

De los resultados obtenidos, se puede indicar que si se requiere obtener el mejor BER se usaría la modulación QPSK para el usuario uno. Sin embargo, hay que considerar que este

esquema tendría una tasa de transmisión menor comparado al usar una modulación 16QAM para el usuario uno.

Tabla 3.6. Valores de la relación Eb/No (M1=QPSK,16QAM,64QAM).

Factor de inyección [dB]	BER	Eb/No [dB]					
		M1=4 (QPSK)		M1=16 (16QAM)		M1=64 (64QAM)	
		User 1	User 2	User 1	User 2	User 1	User 2
-6	10 ⁻³	10.153	18.655	18.122	19.412	-	-
	10 ⁻⁴	11.255	19.642	19.829	20.512	-	-

Con el fin de emitir una conclusión generalizada del escenario de estudio (impacto de la modulación del usuario uno) se realizó varias pruebas fijando el parámetro M1 en 64 es decir 64QAM y se varió el resto de parámetros (M2,k1,k2); posteriormente, se observó que en todos los casos se obtuvo un “piso de ruido” para un BER de aproximadamente 0.5, en pocas palabras, en ningún caso se logra obtener un buen BER para el sistema.

Como conclusión de esta sección se puede indicar que no es posible usar una modulación 64QAM en el usuario uno, así que en ese caso las señales de ambos usuarios no se podrían recuperar. Además, se pudo observar que las modulaciones QPSK y 16QAM dan buenos resultados y su selección dependerá si la prioridad es obtener el mejor BER o la mejor tasa de transmisión posible.

3.1.2.2 Usuario dos

La Figura 3.4 muestra las curvas de BER vs Eb/No generadas por la simulación del sistema. En este escenario de estudio (impacto de la modulación del usuario dos) las configuraciones fijas para el usuario uno y dos son las siguientes: M1=4; k1=5/6; k2=1/2; fac_dB= -6. La figura se estudia con tres diferentes esquemas de modulación para el usuario dos (M2=4; M2=16; M2=64).

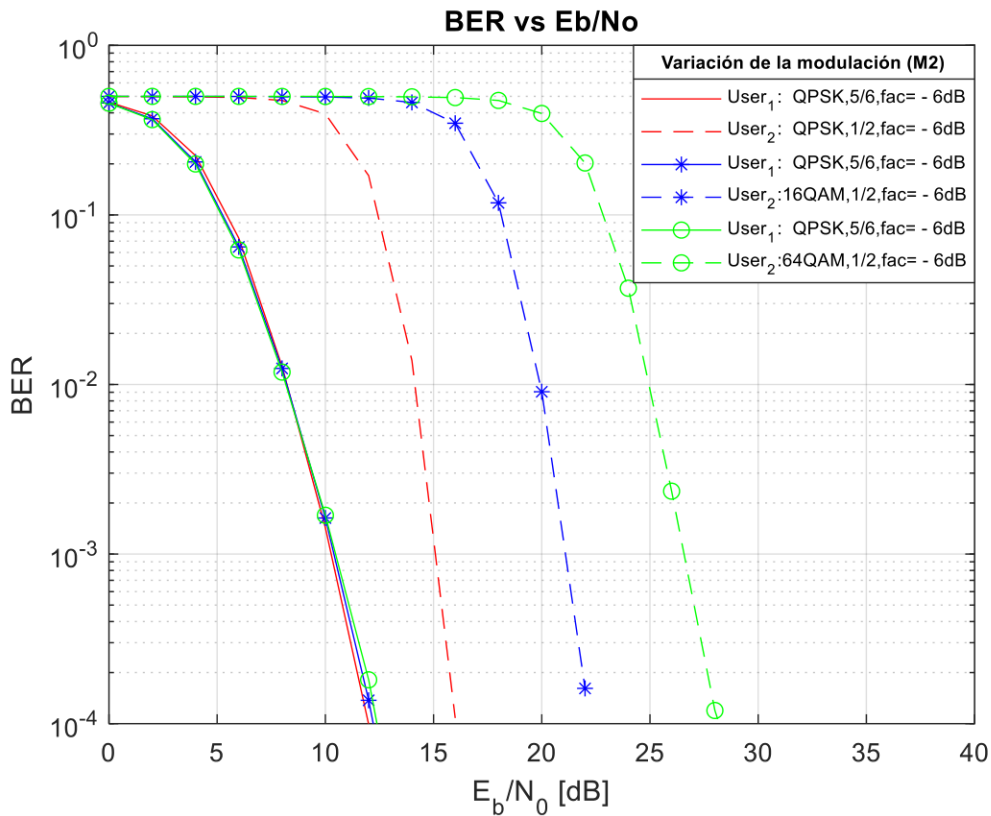


Figura 3.4. BER vs Eb/No con M1=4, k1=5/6; k2=1/2; fac_dB = -6 y M2= QPSK,16QAM,64QAM.

En la Figura 3.4 se observa que, a diferencia del escenario de estudio anterior (impacto de M1), en este el usuario dos, si admite una modulación 64QAM. Además, se puede observar que el BER obtenido depende directamente de la modulación utilizada en el usuario dos. Usando QPSK se puede observar que se obtiene el mejor BER, mientras que al usar 64QAM el BER se degrada, debido que este esquema de modulación es el menos robusto.

Tabla 3.7. Valores de la relación Eb/No de la Figura 3.4 (M2=QPSK,16QAM,64QAM).

Factor de inyección [dB]	BER	Eb/No [dB]					
		M2=4 (QPSK)		M2=16 (16QAM)		M2=64 (64QAM)	
		User 1	User 2	User 1	User 2	User 1	User 2
-6	10 ⁻³	10.262	15.083	10.366	21.097	10.443	26.592
-6	10 ⁻⁴	12.002	16.048	12.190	22.289	12.378	28.217

En la Figura 3.5 se ha optado por otra configuración (M1=16, k1=2/3; k2=1/2; fac_dB = -6 y M2= QPSK,16QAM,64QAM), para ayudar en la comprensión y elaboración de lo que

ocurre en el escenario de estudio (impacto de M2 en el sistema). Mediante las Figuras 3.4 y 3.5 se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos, en primera instancia se ve que con M2=64 se logra un valor de BER superior a 10^{-3} para el usuario uno y dos. En general, la señal del usuario dos tiene una potencia de transmisión más baja y admite modulaciones un poco menos robustas frente a los errores. El hecho de utilizar una modulación más robusta para el usuario dos (QPSK) hará que el rendimiento empeore menos y, por el contrario, al usar una modulación menos robusta (64QAM) hará que el rendimiento empeore más y afectará al usuario dos.

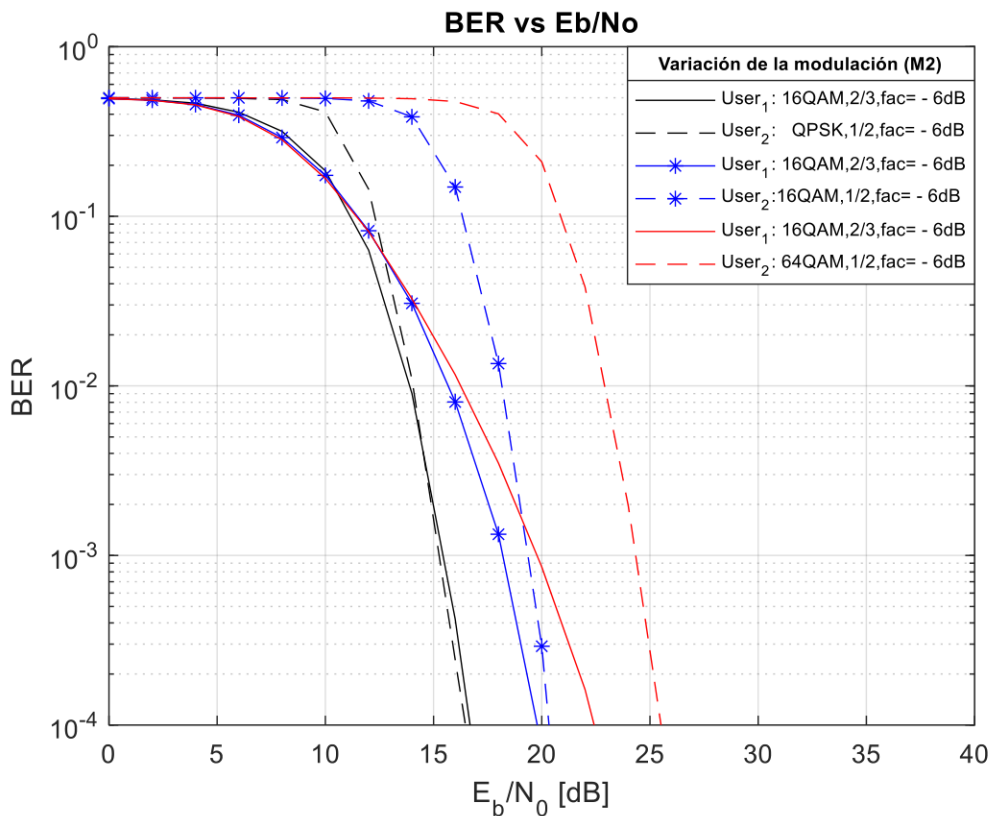


Figura 3.5. BER vs Eb/No con M1=16, k1=2/3; k2=1/2; fac_dB = -6 y M2= QPSK,16QAM,64QAM.

Tabla 3.8. Valores de la relación Eb/No de la Figura 3.5 (M2=QPSK,16QAM,64QAM).

Factor de inyección [dB]	BER	Eb/No [dB]					
		M2=4 (QPSK)		M2=16 (16QAM)		M2=64 (64QAM)	
		User 1	User 2	User 1	User 2	User 1	User 2
-6	10^{-3}	15.438	15.259	18.195	19.365	19.774	24.341
	10^{-4}	16.705	16.490	19.782	20.327	22.411	25.507

3.1.3 IMPACTO DE LA TASA DE CODIFICACIÓN

3.1.3.1 Usuario uno

La Figura 3.6 presenta las curvas de BER vs E_b/N_0 generadas por la simulación del sistema. Las configuraciones para el usuario uno y dos que se mantendrán fijas, para este escenario de estudio (impacto de la tasa de codificación k_1 en el sistema) son estas: $M_1=4$; $M_2=4$; $k_2=1/2$; $fac_dB = -6$. Cada gráfica es analizada con cuatro valores diferentes de tasa de codificación para el usuario uno ($k_1= 1/2$; $k_1= 2/3$; $k_1= 3/4$; $k_1=5/6$).

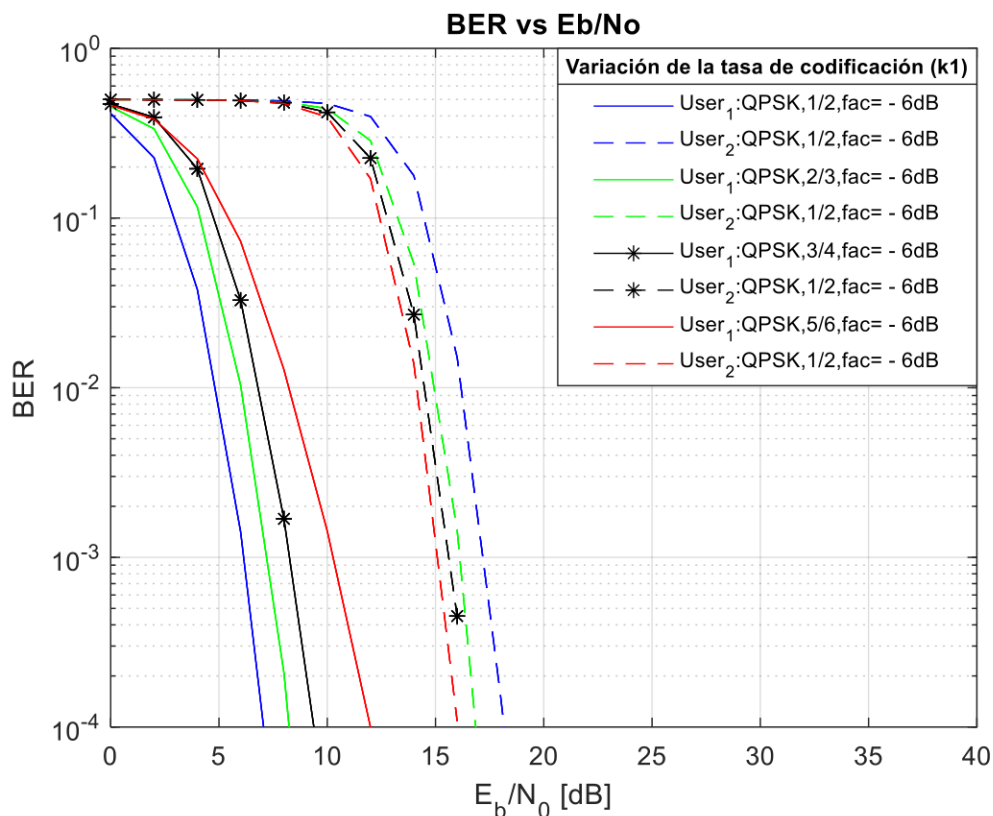


Figura 3.6. BER vs E_b/N_0 con $M_1=4$; $M_2=4$, $k_2=1/2$; $fac_dB = -6$ y $k_1=1/2, 2/3, 3/4, 5/6$.

En la Figura 3.6 se observa la simulación con cuatro diferentes valores de tasa de codificación del usuario uno ($k_1 = 1/2$; $k_1 = 2/3$; $k_1 = 3/4$; $k_1 = 5/6$). Valiéndose de la Figura 3.6 y la Tabla 3.9 se determina que al variar la tasa de codificación k_1 para un BER de 10^{-3} , se tiene la mayor diferencia de E_b/N_0 que corresponde a 11.054 dB con una tasa $k_1=1/2$; le sigue una diferencia de E_b/N_0 de 8.933 dB con una tasa de $k_1=2/3$; a continuación, se tiene una diferencia de E_b/N_0 de 7.369 dB con una tasa de $k_1=3/4$; y finalmente, se obtiene una menor diferencia de E_b/N_0 de 4.820 dB para la tasa de $k_1=5/6$. Al usar una tasa de codificación más grande (5/6), la SNR aumenta (incrementa la potencia de la señal) por lo cual, las curvas del usuario dos se mueven cada vez más hacia la

izquierda, mejorando de esta manera la BER. Por este motivo, se deduce que con la tasa de codificación $k_1=5/6$ se tiene un mejor rendimiento del sistema, pues la diferencia de E_b/N_0 es menor.

De manera general, se puede inferir que siempre y cuando la información del usuario sea recuperada exitosamente en el receptor, es decir, previamente se debió escoger apropiadamente un factor de inyección y un esquema de modulación; el hecho de utilizar una mayor tasa de codificación para el usuario uno ($5/6$) no modifica mayormente el funcionamiento de NOMA-OFDM, ya que en síntesis NOMA-OFDM podría recuperar la información de los dos usuarios, que es el objetivo principal de esta técnica. Lo que sucede como ventaja al usar una tasa de codificación de $5/6$ es que se puede mandar más información.

Tabla 3.9. Valores de la relación E_b/N_0 ($k_1= 1/2, 2/3, 3/4, 5/6$).

		E_b/N_0 [dB]		
		10^{-3}	10^{-4}	
Factor de inyección [dB] -6	BER			
	K1=1/2	User 1	6.138	7.053
		User 2	17.192	18.162
	Diferencia [dB]		11.054	11.109
	K1=2/3	User 1	7.188	8.226
		User 2	16.121	16.851
	Diferencia [dB]		8.933	8.625
	K1=3/4	User 1	8.259	9.399
		User 2	15.628	16.575
	Diferencia [dB]		7.369	7.176
	K1=5/6	User 1	10.273	11.986
		User 2	15.093	16.057
	Diferencia [dB]		4.820	4.071

3.1.3.2 Usuario dos

La Figura 3.7 presenta las curvas de BER vs E_b/N_0 generadas por la simulación del sistema. Las configuraciones fijas para el usuario uno y dos a lo largo de este escenario de estudio (impacto de la tasa de codificación k_2 en el sistema) son las siguientes: $M_1=4$;

M2=4; k1=1/2; fac_dB= -6. Cada gráfica es analizada con cuatro diferentes valores de tasa de codificación para el usuario dos (k2= 1/2; k2= 2/3; k2= 3/4; k2=5/6).

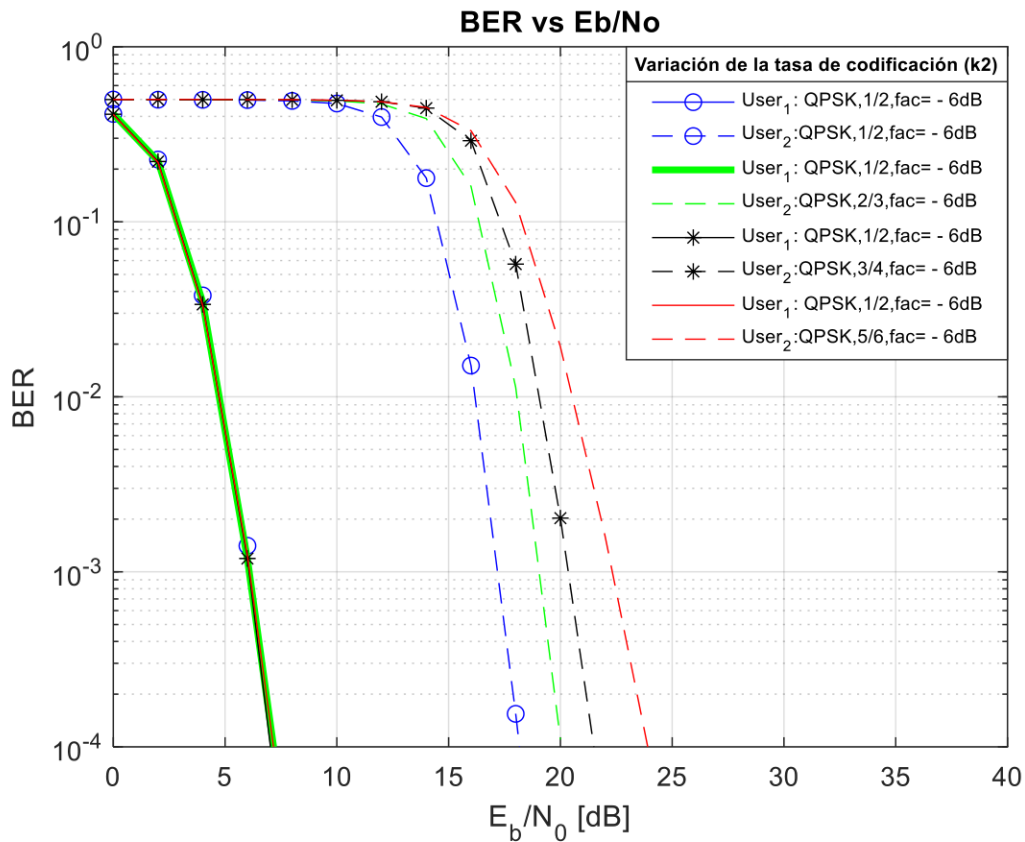


Figura 3.7. BER vs Eb/No con M1=4; M2=4, k1=1/2; fac_dB = -6 y k2=1/2, 2/3, 5/6.

En la Figura 3.7 se observa la simulación con cuatro diferentes valores de tasa de codificación del usuario dos ($k_2 = 1/2$; $k_2 = 2/3$; $k_2 = 3/4$; $k_2 = 5/6$). Valiéndose de la Figura 3.7 y la Tabla 3.10 se observa que al variar la tasa de codificación k_2 , todas las curvas del usuario uno, están prácticamente sobrepuestas; mientras que las curvas del usuario dos son las que varían un poco. Al analizar los valores de la diferencia de E_b/N_0 se tiene que con una tasa de codificación $k_2=1/2$ se alcanza el mejor rendimiento del sistema (curva más a la izquierda).

De manera general, se puede inferir que, con un valor menor de tasa de codificación ($k_2=1/2$) se obtiene el mejor rendimiento, pero a costa de que el usuario envíe una menor cantidad de información; por otro lado, con una tasa de codificación mayor (es decir, $k_2=5/6$) se degrada levemente la BER, pero se tendría un plus, ya que el usuario podría mandar más información.

Tabla 3.10. Valores de la relación Eb/No (k2= 1/2, 2/3, 5/6).

		Eb/No [dB]		
		10⁻³	10⁻⁴	
Factor de inyección [dB] - 6	BER			
	K1=1/2	User 1	6.134	7.053
		User 2	17.179	18.190
	Diferencia [dB]		11.045	11.137
	K1=2/3	User 1	6.077	7.163
		User 2	19.045	20.056
	Diferencia [dB]		12.968	12.893
	K1=3/4	User 1	6.073	7.023
		User 2	20.367	21.508
	Diferencia [dB]		14.294	14.485
	K1=5/6	User 1	6.098	7.163
		User 2	22.337	23.918
	Diferencia [dB]		16.239	16.755

3.2 CONCLUSIONES

- NOMA da cabida a la conectividad masiva, mejorando la eficiencia espectral significativamente en comparación con las técnicas OMA convencionales, pues multiplexa diferentes servicios con distintos requerimientos de robustez y capacidad de datos. En este sentido, esta técnica innovadora de acceso radioeléctrico es importante para mejorar significativamente la eficiencia del espectro.
- La técnica SIC es una parte importante para la operación del sistema, por cuanto esta se utiliza para la detección de la señal en el receptor. Para recuperar los datos del usuario uno: el usuario con mayor potencia de transmisión (usuario 1), se decodifica primero tratando a la señal del usuario 2 como ruido. Finalmente, para recuperar los datos del usuario 2: una vez que se estima y se regenera la señal correspondiente al usuario con mayor potencia de transmisión (usuario 1), su componente de señal se restará de la señal combinada recibida (que contiene las señales de los dos usuarios), para así finalmente recuperar los datos del usuario 2 en recepción.
- Hay que tener en cuenta que el primer usuario detectado (usuario 1) sufre la mayor interferencia entre usuarios, y también de existir algún error de detección en el usuario 1, este pasará al usuario 2, por lo que la asignación del factor de inyección es de suma importancia para el correcto funcionamiento del sistema. El impacto de la interferencia es controlable mediante el uso de diferentes valores de factor de inyección.
- A partir de los resultados de las simulaciones, se ha evaluado el impacto que tiene el factor de inyección sobre el sistema NOMA-OFDM y se ha determinado que, al seleccionar un factor de inyección adecuado, ambos usuarios obtienen un buen BER, razón por la cual, es importante escoger un factor de inyección idóneo para que los niveles de interferencia sean manejables; y al usuario más fuerte, aunque se le asigne la menor potencia, reciba una cantidad apropiada de potencia. Sin embargo, si el factor de inyección es muy alto la señal del usuario 2 interfiere significativamente con el usuario 1 y degrada su BER, también ocurrirá un nuevo problema, como la BER del usuario 1 esta degradada, existirá por ende demasiados errores y si los datos se decodifican con errores, entonces esto conducirá a que se reste una señal incorrecta en el proceso SIC, lo que llevaría a la decodificación de forma errónea de los datos del usuario; es decir, existe una propagación de errores. Por otro lado, si el factor de inyección es muy pequeño, la señal del usuario 2 por ende resultará demasiada pequeña y comparable con el ruido, por lo que no es posible recuperarla en el receptor.

- Con respecto al impacto que presenta el esquema de modulación del usuario uno escogido sobre el sistema NOMA-OFDM se ha determinado que: no se puede emplear una modulación 64QAM, ya que no es posible recuperar las señales de los dos usuarios. La señal del usuario 1 debe tener una modulación más robusta frente a los errores y a las degradaciones, que haga frente a entornos hostiles de canales inalámbricos; por ende, el usuario 1 admite la modulación QPSK y 16QAM; pero si se requiere obtener el mejor BER se usaría la modulación QPSK, sin embargo, se debe considerar que este esquema tendría una tasa de transmisión menor comparado al usar 16QAM. En resumen, la elección de la modulación del usuario uno dependerá si el requerimiento es obtener el mejor BER o la mejor tasa de transmisión posible.
- Referente al impacto que presenta el esquema escogido de modulación del usuario 2 sobre el sistema NOMA-OFDM se ha determinado que: el usuario 2 admite todos los esquemas de modulación, pero debe escogerse de una manera adecuada, pues el rendimiento de NOMA depende de la robustez de la modulación; por consiguiente, al emplear una modulación más robusta para el usuario 2 (QPSK) se obtendrá un mejor rendimiento en el sistema, pues las curvas obtenidas se encuentran más a la izquierda y la diferencia de E_b/N_0 es mínima.
- En cuanto al impacto de la tasa de codificación del usuario 1 sobre el sistema NOMA-OFDM se determinó que al usar la mayor tasa correspondiente a $5/6$, este arrojó el mejor rendimiento para el sistema, ya que, con este valor la SNR aumenta mejorando así la BER; sin embargo, se puede usar las otras tasas de codificación, aunque el rendimiento del sistema será inferior. La ventaja de usar una tasa de codificación de $5/6$ radica en que con esta se puede mandar una mayor cantidad de información.
- En relación con el impacto de la tasa de codificación del usuario 2 sobre el sistema NOMA-OFDM se determinó que: al variar las tasas de codificación del usuario 2 (k_2), las curvas del usuario 1, no sufren ninguna alteración, pues, están prácticamente sobrepuestas; las curvas que presentan una variación son las del usuario 2. Con cualquier valor de k_2 funciona el sistema; no obstante, se observó que con la tasa de codificación $k_2=1/2$ se obtuvo el mejor rendimiento del sistema, pero a costa de que se transmita una cantidad inferior de información. En contraste con $k_2=5/6$ en la cual se degrada levemente la BER, pero el usuario tendría la posibilidad de mandar más información.

3.3 RECOMENDACIONES

- Para obtener figuras del BER vs Eb/No definidas, es imprescindible que la variable iteraciones sea un número alto, como por ejemplo superior a 7000, pues esta variable se emplea en la simulación de Monte Carlo para crear las curvas.
- Al implementar el código de la simulación, no está por demás buscar información de la herramienta ayuda de MATLAB, para completar adecuadamente los parámetros que requieran los distintos comandos empleados del *Communications Toolbox*.
- En el proyecto se fijó la potencia independientemente de las condiciones del canal. Se sabe que el canal inalámbrico es de naturaleza extremadamente dinámica y la asignación fija realizada, no se preocupa por las condiciones instantáneas del canal de los usuarios. Existen mejores formas de optimizar dinámicamente la potencia, basado en los valores de la información de estado del canal (CSI). Como trabajo futuro se puede realizar el análisis del sistema NOMA, implementando una simulación donde la potencia se asigne en función del estado del canal de cada usuario.
- Se puede añadir un estudio sobre el análisis de NOMA con más de dos usuarios. O también realizar un análisis de NOMA en conjunto con la tecnología MIMO.
- En el trabajo presentado se planteó un esquema SIC perfecto, pero se puede ampliar el análisis del sistema NOMA suponiendo un SIC imperfecto, pues en la práctica las señales decodificadas pueden ser canceladas incorrectamente.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Alonso, "Tecnología 5G, Características, usos y posibles peligros", *Grupo Atico34*, el 30 de octubre de 2020. <https://protecciondatos-lopd.com/empresas/tecnologia-5g/> (consultado el 25 de noviembre de 2021).
- [2] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, y K. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, núm. 2, pp. 721–742, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2621116.
- [3] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, y K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", en *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2013 - Proceedings, Germany*, dic. 2013, p. 6692652. doi: 10.1109/VTCspring.2013.6692652.
- [4] K. Higuchi y A. Benjebbour, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98B, núm. 3, pp. 403–414, mar. 2015, doi: 10.1587/transcom.E98.B.403.
- [5] G. O. Morales y J. R. Delgado, "Simulación y análisis de la interferencia ICI en OFDM sobre un enlace punto a punto", *Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones*, p. 83, nov. 2010.
- [6] M. Marjani *et al.*, "Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5247–5261, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2689040.
- [7] C. V. Vargas y W. E. López, "Sistemas de Comunicación Inalámbrica", *Grupo Investigación en Comunicaciones. Dep. Ing. Eléctrica Universidad Federal de Santa Catarina*, vol. 3, núm. 4, p. 17, jun. 2015.
- [8] "MIMO OFDM Wireless Communications with MATLAB.pdf". Consultado: el 17 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.ee.iitm.ac.in/~giri/pdfs/EE6002/book-cho.pdf>
- [9] Y.W. Lin y C.Y. Lee, "Design of an FFT/IFFT Processor for MIMO OFDM Systems", *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.*, vol. 54, núm. 4, pp. 807–815, abr. 2007, doi: 10.1109/TCSI.2006.888664.
- [10] W. Henkel, G. Taubock, P. Odling, P. O. Borjesson, y N. Petersson, "The cyclic prefix of OFDM/DMT - an analysis", en *2002 International Zurich Seminar on Broadband Communications Access - Transmission - Networking (Cat. No.02TH8599)*, feb. 2002, pp. 22–22. doi: 10.1109/IZSBC.2002.991762.
- [11] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-lin, y Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends", *IEEE*

- Commun. Mag.*, vol. 53, núm. 9, pp. 74–81, sep. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [12] N. E. Brito, “Evaluación del Rendimiento de Acceso Múltiple No-Ortogonal (NOMA) en Sistemas LTE (Long Term Evolution)”, p. 40.
- [13] “Análisis y evaluación de desempeño de un esquema coordinado OMA para redes celulares 5G.pdf”. Consultado: el 21 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27737/tesis_LMC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] D. Tse y P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, 1a ed. Cambridge University Press, 2005. doi: 10.1017/CBO9780511807213.
- [15] M. Ghous, Z. H. Abbas, A. K. Hassan, G. Abbas, T. Baker, y D. Al-Jumeily, “Performance Analysis and Beamforming Design of a Secure Cooperative MISO-NOMA Network”, *Sensors*, vol. 21, núm. 12, p. 4180, jun. 2021, doi: 10.3390/s21124180.
- [16] N. I. Miridakis y D. D. Vergados, “A Survey on the Successive Interference Cancellation Performance for Single-Antenna and Multiple-Antenna OFDM Systems”, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 15, núm. 1, pp. 312–335, 2013, doi: 10.1109/SURV.2012.030512.00103.
- [17] R. C. Erpina y V. R. Gopireddy, “Performance of a Non-Orthogonal Multiple Access System with Full-duplex relaying over Nakagami-m Fading”, *Fac. Comput. Blekinge Inst. Technol.*, p. 50, ene. 2021.
- [18] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6a ed. McGRAW-HILL / Interamericana Editores, 2014.
- [19] C. I. Muñoz Rocha, *Metodología de la investigación*. Distrito Federal: Oxford University Press México, 2016.
- [20] L.-R. Guijarro, “Análisis del protocolo IEEE 802.11p en sistemas de comunicación vehiculares V2X”, *Univ. Oberta Catalunya*, p. 85.
- [21] “IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, IEEE, mar. 2019. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- [22] P. F. Guridi, “Códigos Convolucionales y Algoritmo Viterbi”, p. 10, 2019.
- [23] “Convert convolutional code polynomials to trellis description - MATLAB poly2trellis - MathWorks América Latina”. <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/poly2trellis.html> (consultado el 20 de enero de 2022).

- [24] "Punctured Convolutional Coding - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina". <https://la.mathworks.com/help/comm/ug/punctured-convolutional-coding-1.html> (consultado el 18 de enero de 2022).
- [25] "Estudio del rendimiento de la tecnología Non-Orthogonal Multiplexing Access _GorkaPujana.pdf". Consultado: el 12 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/36701/TFM_GorkaPujanaSanchez.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [26] "Teleco in a nutshell v8.7: Modulación de Amplitud en Cuadratura ~ Flu Project". <https://www.flu-project.com/2019/11/teleco-in-nutshell-v87-modulacion-amplitud-cuadratura.html> (consultado el 18 de enero de 2022).
- [27] "Quadrature amplitude modulation (QAM) - MATLAB qammod - MathWorks América Latina". <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/qammod.html> (consultado el 20 de enero de 2022).
- [28] "Modular señal usando el método OFDM - MATLAB - MathWorks América Latina". <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/comm.ofdmmodulator-system-object.html> (consultado el 20 de enero de 2022).
- [29] C. M. Arrieta Tapia, "Simulación de un sistema de comunicación inalámbrica usando la técnica de acceso NOMA (Non - Orthogonal Multiple Access)", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20944/1/CD%2010466.pdf>

5 ANEXOS

ANEXO I. Script y funciones del sistema NOMA-OFDM implementado en Matlab (Anexo Digital).