



Análisis de la técnica NOMA-OFDM en un canal multitrayecto y usando estimación de canal

Analysis of the NOMA-OFDM technique in a multipath channel and using channel estimation

Alex Fernando Conterón Picuasi

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
alex.conteron@epn.edu.ec

Diego Javier Reinoso Chisaguano

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
diego.reinoso@epn.edu.ec
ORCID: 0000-0003-0854-1250

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.002>

Recibido: Junio 06, 2022

Aceptado: Agosto 02, 2022

Resumen: NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) es una técnica de acceso no ortogonal que puede aumentar la eficiencia espectral y es considerada una tecnología candidata para 5G. NOMA-OFDM combina el acceso no ortogonal de NOMA con OFDM que es muy utilizada debido a varias ventajas como su alta eficiencia espectral. La estimación de canal es un proceso indispensable en un sistema NOMA-OFDM por lo que en este trabajo se propone un esquema de estimación de canal con preámbulo para el enlace de bajada, considerando un canal multitrayecto y la técnica LS (*Least Square*). El análisis de los resultados se realiza en base a gráficas de BER (*Bit Error Rate*) vs E_b/N_0 (*Energy per bit to noise power spectral density ratio*) de la simulación implementada en Matlab y muestra que es posible la estimación de canal con el método LS con la ventaja de que es una técnica sencilla aunque produce una degradación de aproximadamente 3 dB en la BER comparada con el caso ideal de estimación perfecta. Además, los resultados muestran que la selección del factor de inyección es muy importante para que el rendimiento de los usuarios sea adecuado.

Palabras clave: NOMA, OFDM, Estimación de Canal, Canal Multitrayecto, 5G.

Abstract: NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) is a non-orthogonal access technique that can increase spectral efficiency and is considered a candidate technology for 5G. NOMA-OFDM combines the non-orthogonal access of NOMA with OFDM, which is widely used due to several advantages such as its high spectral efficiency. Channel estimation is an essential process in a NOMA-OFDM system, so in this paper a channel estimation scheme with preamble for the downlink is proposed considering a multipath channel and the LS (Least Square) technique. The analysis of the results is performed based on graphs of BER (Bit Error Rate) vs E_b/N_0 (Energy per bit to noise power spectral density ratio) of the simulation implemented in Matlab and shows that channel estimation is possible with the LS method with the advantage that it is a simple technique although it produces a degradation of approximately 3 dB in the BER compared to the ideal case of perfect estimation. In addition, the results show that the selection of the injection factor is very important for the performance of the users to be adequate.

Keywords: NOMA, OFDM, Channel Estimation, Multipath Channel, 5G.

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 como 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. 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 SC (*superposition coding*) 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].

La técnica NOMA se puede combinar con OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para conseguir una eficiencia espectral aún más alta. OFDM tiene una buena protección contra el ISI (*Inter Symbol Interference*), puede sobrellevar el desvanecimiento por multitrayecto utilizando técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, también utiliza operaciones FFT/IFFT (*Fast Fourier Transform / Inverse Fast Fourier Transform*) eficientes para la modulación y demodulación de la señal OFDM y ofrece una alta eficiencia espectral. Al igual que en otras técnicas de comunicación inalámbrica, en NOMA-OFDM es necesario realizar la estimación del estado del canal para que el receptor pueda recuperar adecuadamente la información que fue transmitida. Para la estimación de canal en NOMA-OFDM se puede emplear las técnicas que se utilizan en OFDM mediante un preámbulo o subportadoras piloto que son secuencias conocidas en transmisión y recepción, donde la distribución de los pilotos puede variar según las condiciones del canal.

En este artículo se presenta un esquema de estimación de canal mediante preámbulo usando la técnica LS (*Least Square*) para un sistema NOMA-OFDM y los resultados de la simulación en Matlab de la tasa de error en presencia de un canal multitrayecto. El resto de este artículo es organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta un análisis del estado del arte de la estimación de canal en NOMA-OFDM. Luego, la Sección 3 presenta una breve introducción de la técnica NOMA, el proceso de estimación de canal, los diagramas de bloques del sistema propuesto y los parámetros utilizados en la simulación de Matlab implementada. En la Sección 4 se discuten los resultados obtenidos de la simulación. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones alcanzadas con este trabajo.

2. Estado del arte

En [5] los autores presentan un análisis del rendimiento de la estimación de canal con una implementación real de un sistema NOMA-OFDM en el enlace de bajada. Para la estimación de canal utilizan subportadoras piloto que permiten determinar el estado de canal en ciertas subportadoras para luego, usando interpolación, obtener el estado del canal en el resto de subportadoras. Además, antes de la detección se utiliza un ecualizador para compensar el efecto del canal. Los resultados muestran que la tasa de errores obtenida depende del número de subportadoras piloto que se utiliza, siendo mejor el resultado cuando se utilizan más subportadoras piloto. Sin embargo, aunque se tiene un mejor resultado, aumentar el número de subportadoras piloto conlleva una reducción de los datos transmitidos y por ende una disminución de la eficiencia espectral del sistema.

En el trabajo presentado en [6] se propone una estimación de canal iterativa basada en el método de los mínimos cuadrados ponderado para un sistema NOMA-OFDM de enlace ascendente. Primero, un estimador basado en el método de los mínimos cuadrados ponderado es propuesto para la inicialización. Luego, un método iterativo es propuesto en base a un modelo lineal Bayesiano. Los resultados de la simulación presentan el MSE

(*Mean Squared Error*) de dos usuarios en presencia de un canal con desvanecimiento de *Rayleigh* y muestran que la combinación de los métodos propuestos reduce el error y mejoran el rendimiento de la estimación de canal.

En [7] se presenta una detección mejorada para un receptor NOMA-OFDM con cancelación de interferencia sucesiva. Para la estimación de canal se propone un método de intercambio de paquetes cortos al inicio de la operación de NOMA y que luego puede ser repetido cada cierto intervalo de tiempo debido a la variabilidad del estado del canal. La limitación de este esquema es que primero se debe realizar este procedimiento para la estimación de canal de los dos usuarios para luego realizar la transmisión de datos, lo que implica una disminución en la eficiencia del sistema. El trabajo también indica que un método común no es adecuado porque los símbolos de entrenamiento se combinan y promedian lo que causa errores en la estimación de canal y un impacto al momento de recuperar la información de los usuarios.

Un esquema de detección para NOMA-OFDM y basado en aprendizaje profundo se propuso en [8]. El novedoso esquema usa una red neuronal convolucional cuyo objetivo es realizar el proceso de estimación de canal y detección simultáneamente. En cada paquete transmitido se incluye cierto número de subportadoras piloto para la estimación de canal. El sistema es entrenado usando información aleatoria y modulación QPSK. Los resultados se presentan en función del número de pilotos por paquete y se concluye que el rendimiento depende del número de pilotos usados; a mayor número de pilotos el rendimiento es mejor, pero esto implica una reducción en la eficiencia espectral.

Otro trabajo basado en redes neuronales se presenta en [9] y consiste en el análisis de NOMA-OFDM en presencia de errores en la estimación de canal. Los resultados muestran que el esquema propuesto es capaz de obtener el estado de canal cuando no hay interferencia entre símbolo. Sin embargo, en condiciones de desvanecimiento y con presencia de interferencia entre símbolo el rendimiento del sistema no es aceptable.

3. Materiales y métodos

3.1. NOMA

Para resolver el problema de la limitación del espectro se ha desarrollado una nueva solución efectiva que se trata de un esquema de acceso múltiple no ortogonal o NOMA, de tal manera que satisfaga las necesidades de redes de futura generación. Los enfoques no ortogonales se han desarrollado ya que ofrecen una mayor utilización del espectro, lo que significa una ventaja para aplicaciones con requerimientos de alta velocidad de transmisión que envían datos en tiempo real [10].

La técnica NOMA puede dividirse en 2 tipos principales los cuales son NOMA en el dominio del código y NOMA en el dominio de la potencia. En el primero se multiplexa señales de distintos usuarios mediante secuencias de expansión con correlación cruzada no ortogonal [5], en cambio en el segundo tipo se realiza asignaciones de distintos niveles de potencia según sea el caso, el cual dependerá de las condiciones de los canales debido a que múltiples usuarios tendrán acceso a las redes en el mismo instante, por el mismo canal de frecuencia o con el mismo código [11].

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

En el receptor la información de la capa 1 es decodificada considerando a la información de la capa 2 como ruido, en cambio la capa 2 es decodificada con la técnica SIC. Esta técnica consiste en decodificar primero la información del usuario de la capa 1 y luego decodificar la información del usuario de la capa 2 eliminando la información del otro usuario [11].

3.2. Estimación de canal LS

La estimación de canal se realiza mediante símbolos de entrenamiento o subportadoras piloto que son secuencias conocidas por el transmisor y por el receptor. En este trabajo se utiliza un preámbulo y la técnica LS para la estimación de canal.

La señal de entrenamiento recibida afectada por el canal inalámbrico es denotada por Y , X es una matriz diagonal que contiene la secuencia conocida por el transmisor y por el receptor (asumiendo ortogonalidad), H es

un vector que representa las condiciones aleatorias del canal y Z es un vector de ruido blanco de media cero, tal y como se presenta a continuación:

$$Y = XH + Z \quad (1)$$

La estimación de canal usando el método LS se realiza en base a

$$H_{LS} = \frac{Y}{X} \quad (2)$$

y se aplica para cada subportadora según [12,13]

$$H_{LS}[k] = \frac{Y[k]}{X[k]}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3)$$

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

$$X_{Ec}[k] = \frac{Y[k]}{H_{LS}[k]}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

3.3. Esquema propuesto

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques del transmisor NOMA-OFDM propuesto que consiste de dos usuarios independientes a los cuales se les asigna información aleatoria. La información de los usuarios es codificada mediante un codificador FEC (*Forward Error Correction*) para luego ser modulada. Para la aplicación de la técnica NOMA se define un factor de inyección g menor a 1 que multiplica a los datos del usuario 2, esta señal atenuada se suma con los datos del usuario 1.

A la señal que resulta de la suma de los datos de los dos usuarios se le añade un preámbulo definido por el estándar 802.11p con una distribución de pilotos Block Type. De esta forma, el preámbulo es independiente de la interferencia que se crea al sumar la información de los dos usuarios y por ende en el receptor se puede estimar el canal de forma adecuada. Luego de insertar el preámbulo, se aplica el objeto modulador OFDM, donde se especifica los parámetros necesarios para generar los símbolos OFDM y finalmente se transmite los datos por el canal inalámbrico.

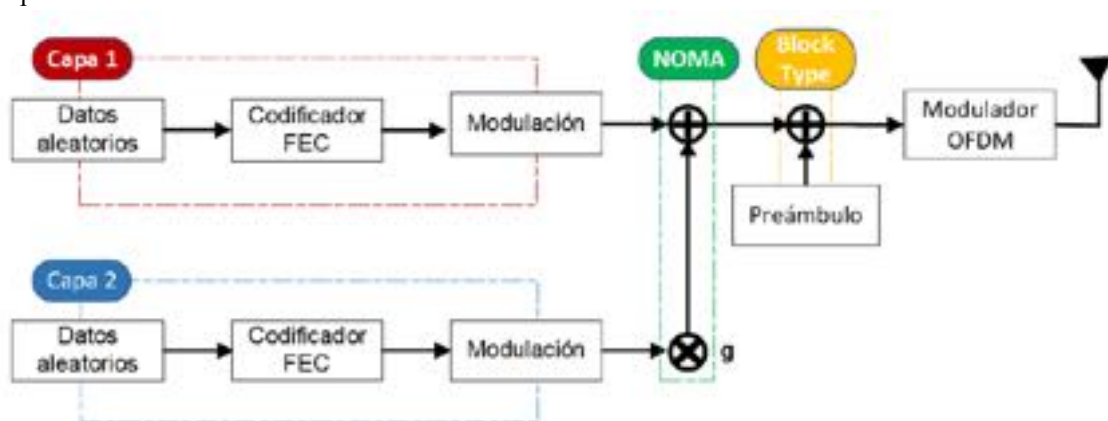


Figura 1. Diagrama de bloques del transmisor NOMA – OFDM.

La Figura 2 presenta el diagrama de bloques del receptor NOMA-OFDM propuesto para el usuario 1. El proceso que se lleva a cabo en el sistema de recepción 1 para recuperar los datos de la capa 1 es inverso al que se realiza

en el transmisor, es decir, se realizan los procesos de demodulación OFDM, estimación de canal, ecualización, demodulación y por último la decodificación de los datos considerando la información de la capa 2 como ruido.

La Figura 3 presenta el diagrama de bloques del receptor NOMA-OFDM propuesto para el usuario 2. El sistema de recepción del usuario 2 es más complejo que el receptor 1 debido a que se debe recuperar la señal de menor potencia. El proceso de demodulación OFDM, estimación de canal LS, ecualización, demodulación y decodificación es similar al receptor del usuario 1. El proceso adicional que se debe realizar se basa en la cancelación de interferencia sucesiva o SIC del usuario 1. Para realizar la cancelación de la señal del usuario 1, la señal a la salida del bloque *Decodificación FEC* es codificada y modulada nuevamente. Luego, la señal resultante es restada de la señal ecualizada y se la divide por g . Finalmente, se demodula y decodifica la señal para obtener los datos del usuario 2.

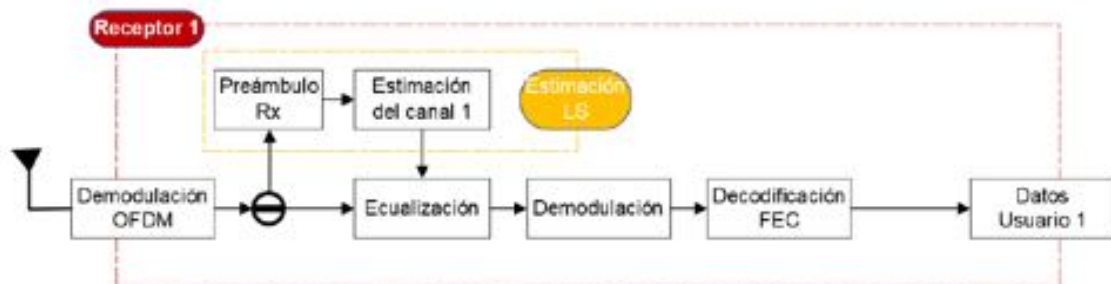


Figura 2. Diagrama de bloques del Receptor 1 NOMA – OFDM (usuario 1).

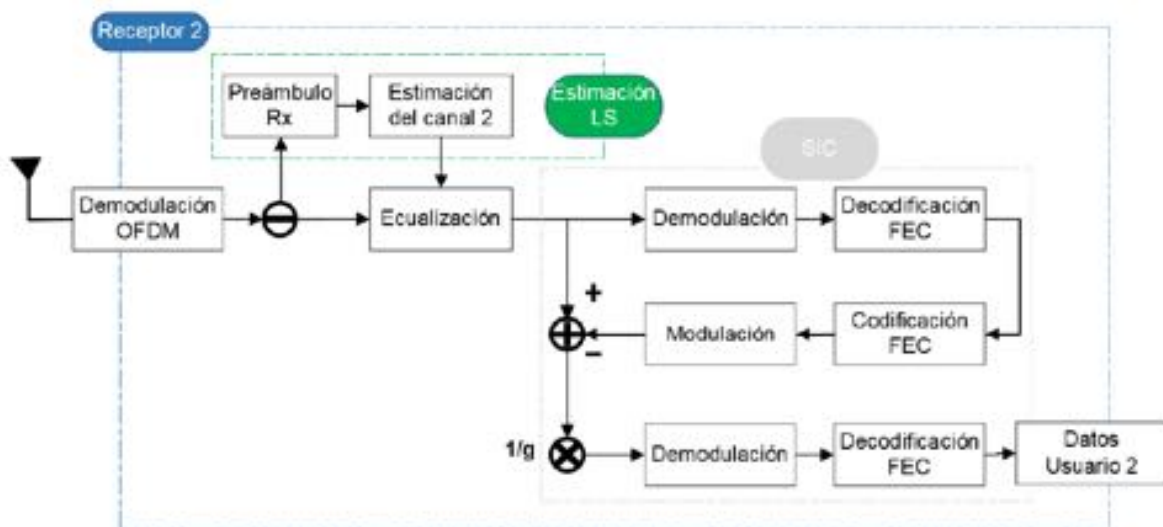


Figura 3. Diagrama de bloques del Receptor 2 NOMA – OFDM (usuario 2).

Es importante mencionar que la estimación de canal se realiza de forma independiente para el receptor de cada usuario ya que se asume que los usuarios estarán en lugares diferentes y por ende el estado del canal de cada uno es diferente. El canal que se añade a cada usuario es un canal multitrayecto con desvanecimiento selectivo en frecuencia y sigue una distribución de *Rician* (cuyos coeficientes son diferentes para cada usuario). Además, se añade ruido AWGN.

3.4. Configuración de la simulación en Matlab

La simulación del sistema de comunicación NOMA - OFDM se realizó en la versión 2019-A de Matlab. Para su desarrollo se establecieron ciertos parámetros fijos que se presentan en la Tabla 1, estos valores se consideran para todas las gráficas que se presentan en la sección de Resultados. Además, los parámetros del perfil de potencia del canal multitrayecto con desvanecimiento de *Rician* se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros de la simulación en Matlab.

| Parámetros | Valor |
|--------------------------------|-------|
| Tamaño de la IFFT | 64 |
| Núm. de subportadoras de datos | 48 |
| Núm. de subportadoras piloto | 4 |
| Tamaño del prefijo cíclico | 16 |
| Núm. de símbolos OFDM/paquete | 5 |

Tabla 2. Perfil de potencia del canal.

| | Rayo | Retardo Relativo [ns] | Potencia Promedio [dB] |
|------------------------|------|-----------------------|------------------------|
| Canal de Rician (K=10) | 1 | 0 | 0 |
| | 2 | 100 | -8 |
| | 3 | 200 | -10 |
| | 4 | 300 | -15 |

4. Resultados

Los resultados de las simulaciones son presentados mediante las gráficas de BER (*Bit Error Rate*) vs E_b/N_0 (*Energy per bit to noise power spectral density ratio*), donde, el sistema NOMA - OFDM con la técnica de estimación de canal LS es comparado con un sistema con estimación de canal perfecta. Para la estimación de canal perfecta se asume que idealmente se conoce la respuesta del canal.

En las figuras que se presentan en esta sección, las curvas con línea sólida representan la estimación perfecta del canal en el sistema NOMA - OFDM, mientras que las curvas con línea entrecortada representan la estimación de canal LS del sistema de comunicación. Así mismo, las curvas de color rojo representan el rendimiento del sistema de la capa 1 (usuario 1) y las curvas de color azul representan el rendimiento del sistema de la capa 2 (usuario 2). En la leyenda de cada figura se utiliza C1 para indicar el resultado de la capa 1 y C2 para la capa 2.

En la Figura 4 se presenta el BER vs E_b/N_0 cuando la capa 1 se ha codificado empleando una tasa de codificación de 3/4 con modulación 16QAM, mientras que en la capa 2 se ha empleado una tasa de codificación de 1/2 con modulación 16QAM y un factor de inyección de -6 dB. La figura muestra que la BER de la capa 2 está desplazada hacia la derecha comparada con la capa 1. Este resultado es esperado, ya que la interferencia de la capa 1 crea una degradación de la BER de la capa 2. Es importante mencionar que para la capa 2 se utilizó una tasa de codificación (1/2) diferente a la de la capa 1, ya que la capa 2 sufre degradación de la BER y se busca que la diferencia con la capa 1 no sea muy grande. Además, se puede observar que la BER usando la estimación de canal LS se degrada y esto se evidencia con el desplazamiento de las curvas hacia la derecha para ambas capas. Para conseguir un BER de 10^{-3} con estimación perfecta del canal la capa 1 requiere un E_b/N_0 de 26,44 dB, y con estimación LS se necesita un E_b/N_0 de 28,88 dB. Para la estimación perfecta de la capa 2 con el mismo valor de BER se necesita un E_b/N_0 de 28,06 dB y para la estimación LS se requiere 31,07 dB. Para la capa 1 la degradación de la señal es de 2,44 dB y para la capa 2 la degradación es de 3,01 dB.

La Figura 5 presenta el BER vs E_b/N_0 cuando la capa 1 se ha codificado empleando una tasa de codificación de 3/4 con modulación 16QAM, mientras que en la capa 2 se ha empleado una tasa de codificación de 1/2 con modulación 64QAM y un factor de inyección de -6 dB. La figura muestra que la BER de la capa 2 está más desplazada hacia la derecha comparada con la capa 1; esto se da ya que la modulación utilizada en la capa 2 es menos robusta y causa una mayor degradación de la BER. Sin embargo, al mismo tiempo usar modulación 64QAM aumenta la tasa de transmisión del sistema. En cuanto a la estimación de canal LS, se puede observar en la figura que hay una degradación de alrededor de 3 dB para ambas capas.

De los resultados de las Figuras 4 y 5 se puede concluir que la estimación de canal LS causa una degradación de aproximadamente 3 dB en la BER de ambos casos. Esta degradación es de esperarse ya que el

ruído AWGN afecta la estimación LS y esta es una limitación propia del método de estimación de canal LS. Pero, a pesar de la degradación el método LS es muy sencillo por lo que es muy utilizado en sistemas de comunicaciones basados en OFDM. Además, los resultados muestran que es posible utilizar un método sencillo de estimación de canal LS basado en preámbulo para un sistema NOMA-OFDM.

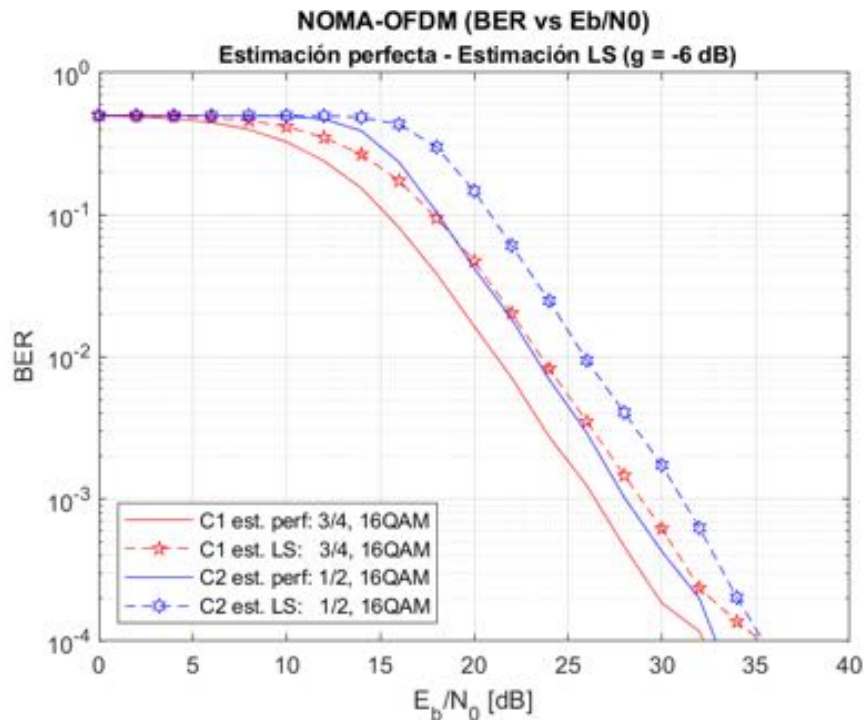


Figura 4. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación 3/4 y modulación 16QAM. Capa 2: tasa de codificación 1/2, modulación 16QAM y g de -6 dB.

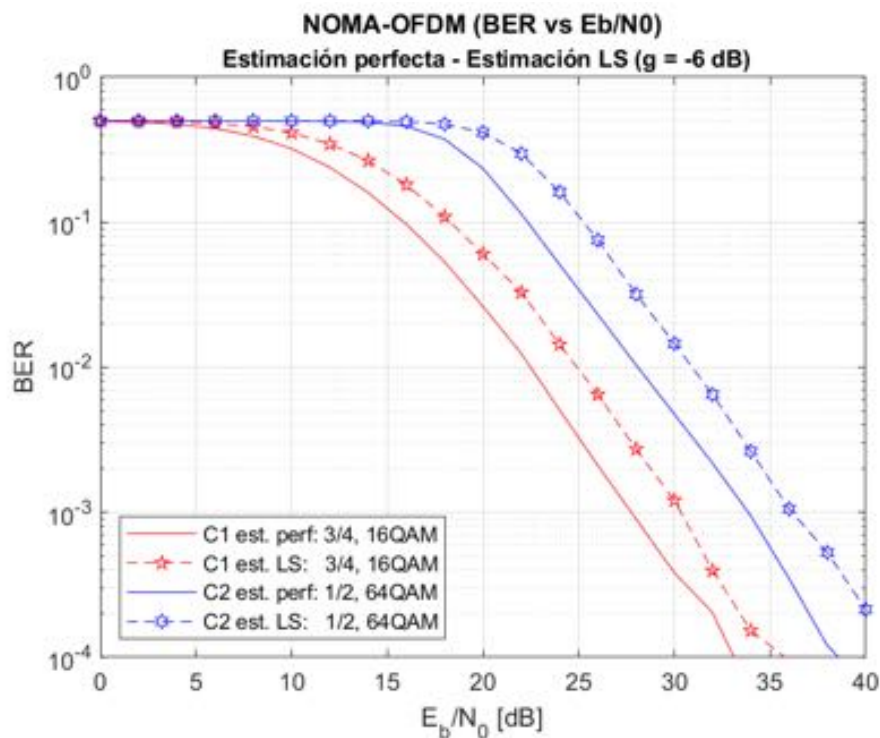


Figura 5. BER vs E_b/N_0 . Capa 1: tasa de codificación 3/4 y modulación 16QAM. Capa 2: tasa de codificación 1/2, modulación 64QAM y g de -6 dB.

En la Figura 6 se presentan las curvas de BER vs E_b/N_0 de la estimación de canal LS para 3 valores diferentes de tasa de codificación de la capa 2 mientras la tasa de la capa 1 es constante. La tasa de codificación del sistema NOMA - OFDM determina que tan robusta contra los errores es la señal que va a ser transmitida por el canal inalámbrico. Las curvas de las señales de la capa 2 presentadas mediante las líneas de color celeste, azul y verde, muestran que mientras más robusta es la tasa de codificación de la capa 2, el BER mejora. Sin embargo, hay que notar que una tasa de codificación más robusta (por ejemplo 1/2) transmite menos información comparada con una tasa menos robusta como la de 3/4. Esta figura muestra que se puede mejorar la BER utilizando una tasa más robusta, pero con la limitante de reducir la tasa de transmisión del sistema.

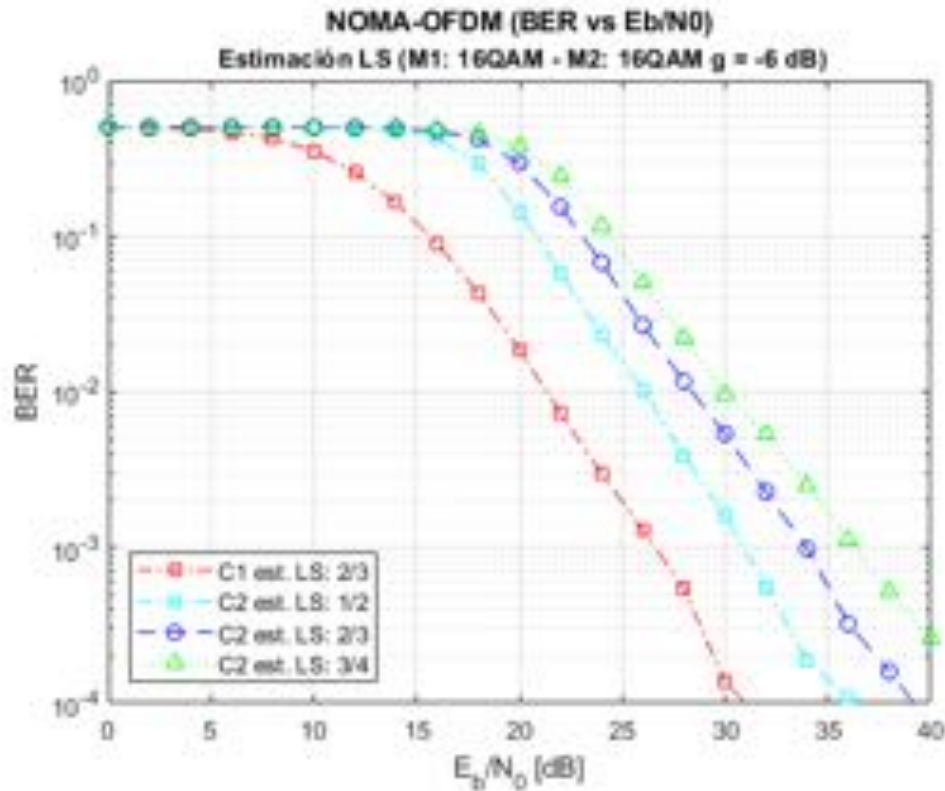


Figura 6. BER vs E_b/N_0 con estimación de canal LS para distintos valores de tasa de codificación.

En la Figura 7 se presentan las curvas de BER vs E_b/N_0 de la estimación de canal LS para 3 valores diferentes del factor de inyección. Todas las simulaciones de la figura se realizaron con tasas de codificación de 3/4 y 1/2 para la capa 1 y 2 respectivamente, y la modulación utilizada es 16QAM para ambas capas. Las curvas de color negro y celeste corresponden a la configuración 1, las curvas rojo y azul corresponden a la configuración 2 y las curvas morada y verde corresponden a la configuración 3. En la primera configuración ($g = -5$ dB) la señal de la capa 2 no se atenúa lo suficiente, provocando que las señales de ambas capas se interfieran y se reduzca considerablemente el rendimiento del sistema. La segunda configuración ($g = -6$ dB) presenta un buen resultado ya que la BER mejora significativamente y es similar para ambos usuarios por lo que ambos obtienen un rendimiento más equitativo. En el caso de la tercera configuración ($g = -8$ dB), aunque la capa 1 obtiene una BER muy buena, la BER del usuario 2 se degrada significativamente por lo que este esquema perjudicaría al usuario 2. Estos resultados nos permiten concluir que hay que encontrar un factor de inyección intermedio que permita obtener una BER adecuada para ambos usuarios.

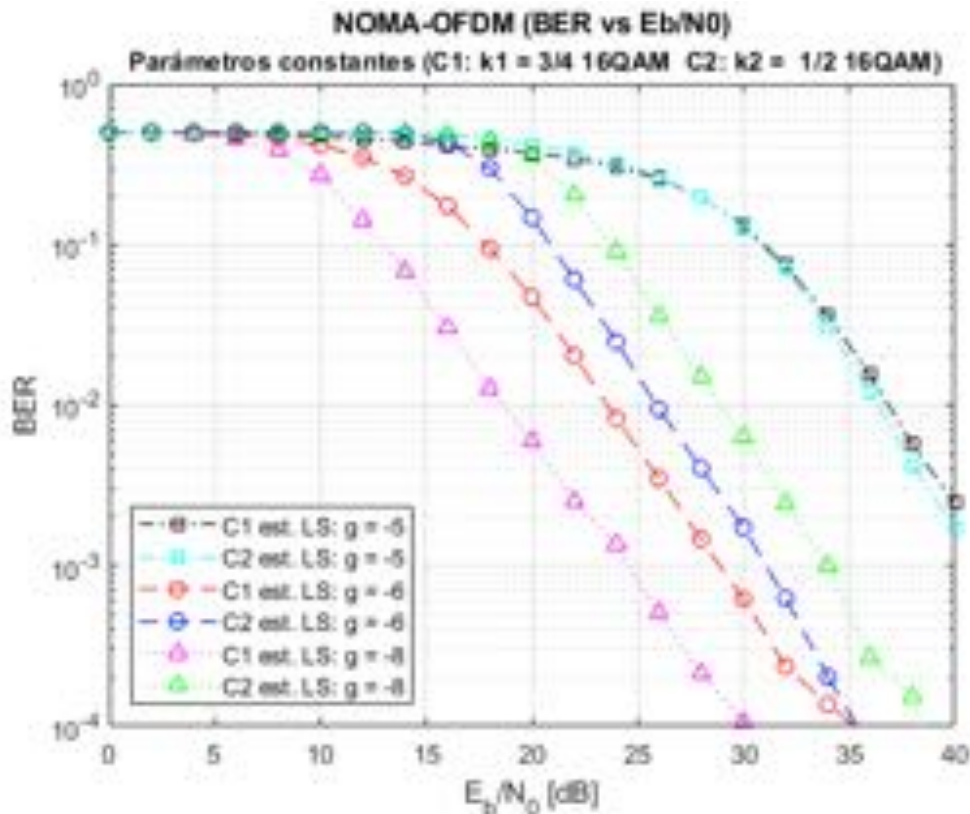


Figura 7. BER vs Eb/N0 con estimación de canal LS para distintos valores de g.

5. Conclusiones

En este artículo se presentó un análisis de la técnica NOMA-OFDM en un canal multirrayecto y usando estimación de canal. Se propone un esquema con un transmisor que combina la información de dos usuarios en el dominio de la potencia usando un factor de inyección para la capa 2 y se transmite un solo preámbulo para la estimación de canal en los receptores de cada usuario. Los resultados de la simulación mostraron que la estimación de canal LS con el esquema propuesto es posible, pero causa una degradación de aproximadamente 3 dB en la BER y esta es una limitación propia del método de estimación de canal LS. Además, los resultados muestran que es posible utilizar un método sencillo de estimación de canal LS basado en preámbulo para un sistema NOMA-OFDM.

También, los resultados de la BER usando estimación de canal LS y variando la tasa de codificación de la capa 2 muestran que se puede mejorar la BER utilizando una tasa más robusta, pero con la limitante de reducir la tasa de transmisión del sistema.

Finalmente, se puede concluir que la selección del factor de inyección es muy importante ya que valores muy pequeños o altos pueden causar mucha interferencia o perjudicar al usuario de la capa 2 (que tiene menor potencia). Por esta razón, la selección del factor de inyección se debe realizar tratando de obtener el mejor rendimiento de ambos usuarios. Como trabajo futuro se propone utilizar este mismo esquema para estimar en NOMA-OFDM el desfase de la frecuencia de portadora que es un fenómeno común en los sistemas OFDM y que puede degradar significativamente su rendimiento.

6. Referencias

- [1] Alonso, N. (2020). *Tecnología 5G, Características, usos y posibles peligros*. <https://protecciondatos-lopd.com/empresas/tecnologia-5g/>
- [2] Riazul Islam, S. M., Avazov, N., Dobre, O. A., Kwak, K. (2017). Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19 (2), 721-742. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116>

- [3] Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., Higuchi, K. (2013). *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access*. IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6692652>
- [4] Higuchi, K., Benjebbour, K. H. (2015). Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access. *IEICE Transactions on Communications, E98-B* (3), 403-414. <https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.403>
- [5] Angjo, J., Tuncer, M. M., Akertek, E., Alakoca, H., Başaran, M., Durak-Ata, L. (2020). *On the Channel Estimation Performance of NOMA Systems: Experimental Implementation of Real-Time Downlink NOMA-OFDM*. IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). Odessa, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234965>
- [6] Balogun, M. B., Takawira, F., Oyerinde, O. O. (2019). *Weighted Least Square Based Iterative Channel Estimation for Uplink NOMA-OFDM Systems*. 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). Coast, QLD, Australia. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS47537.2019.9008698>
- [7] Ghazi, H. S., Wesolowski, K. W. (2019). Improved Detection in Successive Interference Cancellation NOMA OFDM Receiver. *IEEE Access*, 7, 103325-103335. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931809>
- [8] Xie, Y., Teh, K. C., Kot, A. C. (2021). *Deep Learning-Based Joint Detection for OFDM-NOMA Scheme*. *IEEE Communications Letters*, 25 (8), 2609-2613. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3077878>
- [9] Pandya, S., Wakchaure, M. A., Shankar, R. (2021). Analysis of NOMA-OFDM 5G wireless system using deep neural network. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 1-8. <https://doi.org/10.1177%2F1548512921999108>
- [10] Wang, P., Xiao, J., Ping, J. (2006). Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 1 (3), 4-11. <https://doi.org/10.1109/MVT.2006.307294>
- [11] Ding, Z., Adachi, F., Poor, H. V. (2016). The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (1), 537-552. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2475746>
- [12] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM Wireless communications with Matlab*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470825631>
- [13] Biguesh, M., Gershman, A. B. (2006). Training-based MIMO channel estimation: a study of estimator tradeoffs and optimal training signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54 (3), 884-893. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.863008>