



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**EVALUACIÓN DE OFDM-IM CON Y SIN CODIFICACIÓN LDPC EN  
SISTEMAS 6G.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTOR: Michael Alexander Laica Cruz.  
TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito-Ecuador  
2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Michael Alexander Laica Cruz con documento de identificación N°. 1723968358; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Michael Alexander Laica Cruz', written over a light blue grid background.

---

Michael Alexander Laica Cruz

1723968358

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Michael Alexander Laica Cruz con documento de identificación N°. 1723968358, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico : “Evaluación de OFDM-IM con y sin codificación LDPC en sistemas 6G”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,



---

Michael Alexander Laica Cruz

1723968358

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE OFDM-IM CON Y SIN CODIFICACIÓN LDPC EN SISTEMAS 6G, realizado por Michael Alexander Laica Cruz con documento de identificación N° 1723968358 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

1713583126

## DEDICATORIA

Este título se lo dedico a mi amada madre Irina Cruz que en vida fue quien me enseñó a superarme y no darme por vencido, en los momentos más difíciles que pensaba darme por vencido, pero no lo hice sintiendo que en algún lugar donde este me observa y hoy esta orgullosa de este logro no solo es mío sino también de toda mi familia que me dio su apoyo y no me dejó solo en este camino para llegar a ser un Ingeniero, en donde quiera que estes te amo y te extraño mucho mami.

Las palabras se quedan cortas para expresar el sentimiento que recorre mis memorias al recordar el primer día de clases, cuando no sabía en donde estaba parado o que iba a ser de mi los próximos años, si iba a tener buenos compañeros y los ingenieros que me iban a transmitir sus conocimientos iban a ser estrictos, ahora al culminar mis estudios universitarios me doy cuenta que los miedos son solo el comienzo de algo increíble, pude conocer a grandes compañeros de aula y otros por coincidir en la universidad, no debemos tener miedo a lo desconocido porque se puede aprender algo muy agradable de todo sean buenas o malas experiencias, siempre se aprende algo nuevo, a mi yo del futuro; no tengas miedo de nada nos hemos superado de casi todo y esa es nuestra fuerza ya que ahí radica nuestro ser, el porque nos caemos es para volvernos a levantar con la cabeza en alto y con más fuerza.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis queridos ingenieros que a veces cuando me notaban distraído o sin rumbo supieron acercarse a mí y preguntar el porqué de mí situación, me ayudo mucho ya que en su entendimiento me supieron extender su mano y darme un consejo para seguir adelante y no dejar de estudiar y lograr este título, los voy a llevar siempre en mi corazón.

Mis compañeros de aula y mis amigos gracias por sus palabras de aliento y el apoyo que se necesito para llegar tan lejos.

Mis agradecimientos más sinceros a mi Ingeniero tutor de tesis, gracias por su paciencia y apoyo en este ultimo tramo de mi carrera con su enseñanza se pudo lograr un entendimiento adecuado de la investigación y gracias a ello si pudo obtener los mejores resultados, espero siempre sea esa gran persona que pude como conocer, éxitos en todas sus metas.

# EVALUACIÓN DE OFDM-IM CON Y SIN CODIFICACIÓN LDPC EN SISTEMAS 6G

## EVALUATION OF OFDM-IM WITH AND WITHOUT LDPC CODING IN 6G SYSTEMS

Michael Laica, Milton N. Tipán<sup>3</sup> 

### Resumen

En este artículo, se evaluó el desempeño de la modulación multiportadora OFDM-IM candidato para 6G con y sin codificación LDPC, los resultados muestran que no existe evidencia que indique una mejora significativa en cuanto al BER y al SER al utilizar este tipo de codificador de fuente.

**Palabras clave:** OFDM-IM, LDPC, Q-PSK.

### Abstract

In this article, the performance of the OFDM-IM multicarrier modulation candidate for 6G with and without LDPC coding was evaluated, the results show that there is no evidence that indicates a significant improvement in terms of BER and SER when using this type of encoder source.

**Keywords:** OFDM-IM, LDPC, Q-PSK.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mlaica@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

## 1. Introducción

El rápido avance tecnológico en la industria ha resultado en un aumento exponencial en la cantidad de dispositivos conectados, creando una cantidad de tráfico de datos casi inmanejable en las redes inalámbricas actuales. Las formas de onda OFDM Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonal (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) se han utilizado de diversas maneras y han sido bien recibidas en muchos sistemas de comunicación inalámbrica existentes. En la actualidad existen nuevos tipos de técnicas de modulación para que los sistemas OFDM aumenten la capacidad de transmisión de datos de cada subportadora utilizada en el espectro de frecuencias, y se investigan estas nuevas formas de onda para responder a los requisitos de servicio en redes inalámbricas 6G y superiores [1].

La configuración, OFDM-IM Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal - Modulación de Índice (orthogonal frequency division multiplexing-index modulation, OFDM-IM) mejora la eficiencia espectral sobre los sistemas OFDM, la complejidad computacional de la forma de onda OFDM-IM sigue siendo un problema abierto. Sin embargo, estos códigos no están exentos de desafíos y problemas que deben abordarse para garantizar una transmisión de datos confiable y sin errores [1]. En el caso de los códigos convolucionales, utilizados en sistemas como 4G, uno de los problemas comunes es la complejidad computacional. Por otro lado, los códigos Reed-Solomon, utilizados en sistemas como 4G y 5G, también presentan ciertos problemas. Si varios bits consecutivos se ven afectados por errores, los códigos Reed-Solomon no pueden ser capaces de corregirlos correctamente [2] [6].

Además, tanto los códigos convolucionales como los Reed-Solomon pueden enfrentar problemas de latencia. La codificación y decodificación de estos códigos requiere tiempo, lo que puede introducir una demora significativa en la transmisión de datos. En resumen, los problemas asociados con los códigos detectores y correctores de errores en las redes 4G y 5G incluyen la complejidad computacional de los códigos convolucionales, la sensibilidad de los códigos Reed-Solomon a los errores ráfaga y la latencia derivada por la codificación y decodificación de estos códigos. Superar estos desafíos es fundamental para garantizar una transmisión de datos confiable y de alta calidad en las redes móviles de próxima generación [2] [3].

OFDM han sido ampliamente utilizados, y presentan desafíos como emisiones fuera de banda y problemas de potencia pico-promedio. Para abordar estas limitaciones, se exploran nuevas técnicas de modulación, como OFDM-IM, que mejora la eficiencia

espectral, aunque sigue siendo un desafío computacional. Se propone un método de detección basado en energía ML Máxima verosimilitud (maximum likelihood, ML), con menor complejidad que OFDM-IM, manteniendo un rendimiento cercano a lo óptimo [1].

En cuanto a los códigos detectores y correctores de errores, cruciales en las redes 4G y 5G, se enfrentan a desafíos específicos. Los códigos convolucionales, eficientes, pero computacionalmente costosos, plantean problemas de consumo de energía y rendimiento. Los códigos Reed-Solomon, aunque efectivos, son sensibles a errores ráfaga y ambos enfrentan problemas de latencia en la transmisión de datos [7].

6G es la próxima generación de tecnología de comunicaciones inalámbricas, destacando sus capacidades mejoradas en velocidad, capacidad, latencia y confiabilidad en comparación con el 5G. El 6G está diseñado para ofrecer velocidades de datos ultrarrápidas, capacidad masiva de dispositivos conectados y una experiencia más inmersiva en realidad virtual y aumentada. Se anticipa que esta tecnología impulsará avances en inteligencia artificial, IoT, realidad virtual/aumentada y automatización industrial, proporcionando mayor eficiencia energética y ancho de banda [5] [4].

Se presenta OFDM-IM como una señal preferida para 6G debido a su alta eficiencia espectral, resistencia a interferencias, baja latencia y capacidad para admitir múltiples usuarios simultáneamente. Esta técnica de modulación se destaca por su capacidad para transmitir grandes cantidades de datos en un ancho de banda limitado, así como su adaptabilidad y baja latencia, fundamentales para aplicaciones en tiempo real.

Los códigos LDPC Comprobación de Paridad de Baja Densidad (low-density parity-check, LDPC) son considerados como excelentes códigos de detección y corrección de errores, destacando su eficiencia en la corrección de errores cercana a la capacidad de Shannon. Estos códigos se caracterizan por su adaptabilidad, versatilidad y escalabilidad para diversas aplicaciones y volúmenes de datos. Además, el algoritmo de decodificación de LDPC es eficiente en términos de hardware y software, convirtiéndolos en una opción atractiva para sistemas en tiempo real y aplicaciones con limitaciones de recursos. Su resistencia contra diferentes tipos de errores, como errores aleatorios y errores burst, se atribuye a la distribución uniforme de la paridad en todo el código [8] [9].

A principios de la década de 2000, se desarrolló la red móvil 4G como la cuarta generación basada en tecnología 3G, con una ventaja clave de proporcionar un rendimiento aumentado hasta 1 Gbps para recep-

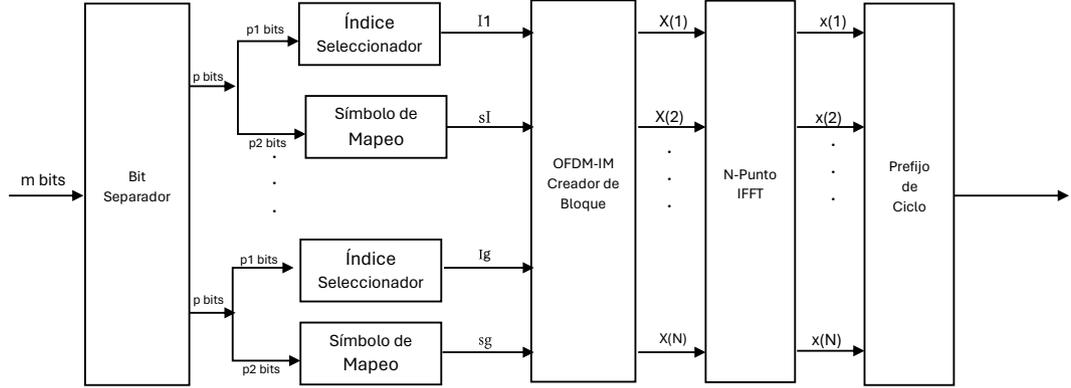


Figura 1. Bloque de Transmisor OFDM-IM.

tores estáticos y 100 Mbps para usuarios móviles. El estándar 4G permitió la convergencia de 3G con redes inalámbricas basadas en el protocolo IP [7] [3].

Con el avance continuo, se vislumbra la próxima generación de redes móviles, 5G, que promete velocidades de transmisión 10 veces más rápidas que 4G. La investigación global se centra en conceptos y tecnologías para las redes móviles de quinta generación, con requisitos ambiciosos y diversas tecnologías consideradas, especialmente en frecuencias de 6 GHz a 100 GHz y tecnologías avanzadas de antena como MIMO Múltiple entrada y múltiple salida, grande (multiple-input multiple-output, MIMO) y formación de haces [5] [7] [4].

## 2. LDPC

La codificación y decodificación de códigos LDPC son esenciales para lograr una transmisión confiable de información en canales ruidosos. Estos códigos destacan por su capacidad para alcanzar un rendimiento cercano al límite de Shannon en canales con ruido aditivo blanco gaussiano AWGN Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (Additive White Gaussian Noise Channel, AWGN). Durante la codificación, se genera una matriz de verificación de paridad de baja densidad con estructura esparsa, añadiendo redundancia a los datos mediante bits de paridad [15]. El proceso de decodificación implica encontrar la mejor aproximación de los bits de información transmitidos a partir de los bits recibidos, utilizando algoritmos iterativos como el algoritmo de sum-product o el algoritmo de mensaje de creencia. El algoritmo de sum-product, ampliamente utilizado, sigue un proceso iterativo representado por un diagrama de bloques que muestra

la conexión entre nodos de información y paridad, así como la propagación de mensajes a lo largo del grafo. Estos mensajes contienen información sobre la probabilidad de cada bit sea 0 ó 1 [8] [9].

La iteración continúa hasta que se cumple un criterio de terminación, como alcanzar un número máximo de iteraciones o cuando la calidad de la estimación de los bits de información es suficientemente alta. Al finalizar, los bits estimados se comparan con los bits originales para evaluar la calidad de la decodificación [13].

El transmisor implementa la técnica OFDM-IM, donde los bits codificados mediante LDPC se dividen en grupos, cada uno asignado a un subbloque OFDM-IM. En cada subbloque, un selector de índice decide qué subportadoras activar basándose en una tabla de consulta. Estas subportadoras transmiten símbolos modulados, y los bits de modulación se determinan mediante el uso de índices de subportadoras activas. A diferencia del OFDM clásico, donde los bits se transmiten solo mediante símbolos modulados, OFDM-IM utiliza índices de subportadoras activas, lo que mejora el espectro de distancia entre posibles secuencias de subbloques [1] [9] [8].

## 3. OFDM-IM

OFDM-IM es un esquema que emplea varios subbloques OFDM antes de recopilar y transferir sus salidas al bloque OFDM principal. Cada subbloque incorpora un selector de índice y un mapeador, permitiendo la elección de subportadoras y la proyección de bits en constelaciones. Los índices de las subportadoras pueden modular la información, lo que brinda al sis-

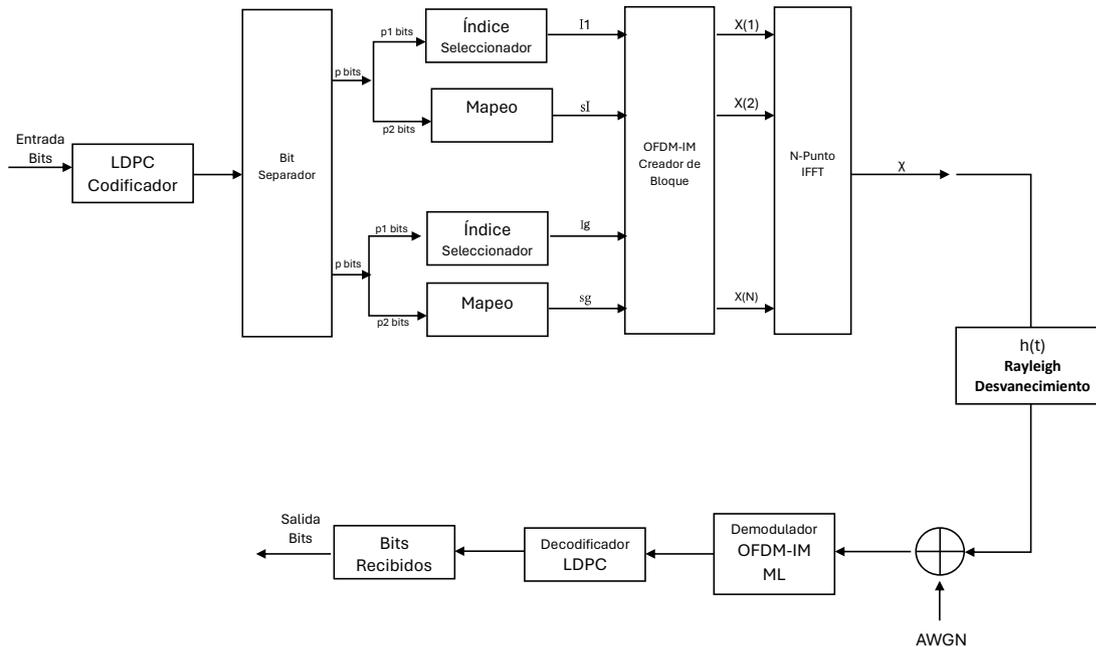


Figura 2. Configuración LDPC OFDM-IM.

tema OFDM-IM compensaciones en rendimiento y eficiencia energética, Como se observa en figura 1 [6] [14].

OFDM, un sistema multiportadora, facilita la transferencia de un flujo de datos en serie de alta velocidad a flujos paralelos de baja velocidad mediante la utilización de subportadoras ortogonales con espectros superpuestos. Esta tecnología ha sido ampliamente adoptada en la transmisión de medios digitales, redes inalámbricas y comunicaciones móviles 5G a nivel mundial. La incorporación de tecnología SM en el sistema OFDM contrarresta el desvanecimiento de la señal y aumenta su capacidad [1] [6].

#### 4. Configuración de la simulación

Una transmisión para 6G fue simulada mediante la transmisión de la señal multiportadora OFDM-IM, en un canal AWGN con y sin codificación. Se enviarón 32400 bits que se codificaron en el LDPC cuyas palabras código fueron divididas para índices y otras pasaron al modulador digital QPSK Modificación por cambio de fase (Phase Shift Keying, PSK) en grupos de subbloques, estos generaron un solo bloque que representa la señal en el dominio de la frecuencias, por que el uso de la transformada rápida inversa de Fourier (Fast Fourier Transform, IFFT) es utilizada para pasar la señal al dominio del tiempo. La simulación del ruido en el canal se realizó para  $\frac{Eb}{No}$  desde 0 hasta 40 dB, para evaluar el BER Proporción de errores de

bits (Bit Error Ratio, BER) y el SER tasa de error de símbolos (symbol error rate, SER), el receptor. Para la demodulación de la señal OFDM-IM se uso el algoritmo de demodulación ML, cuyos símbolos recibidos pasaron al demodulador digital de Q-PSK, luego por el decodificador LDPC y finalmente con los bits recibidos se procedio a evaluar el desempeño mediante curvas de BER y SER. Como se observa en figura 2.

#### 5. Resultados y análisis

La señal OFDM-IM sintética se puede observar en la figura 3, un alto PAPR es posible apreciar aún cuando la amplitud esta en milivoltios.

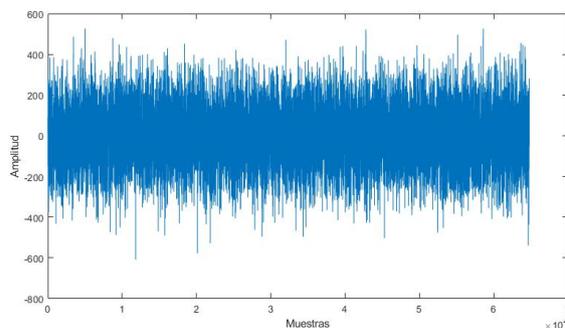


Figura 3. Señal OFDM-IM

Esta señal fue pasada por un canal con desvanecimiento de Rayleigh con ruido AWGN y su desempeño fue medido, los resultados son mostrados en la figura 4, se observa que no existe una ganancia de codificación apreciable, salvo para un  $\frac{E_b}{N_o} = 35dB$ , donde una pequeña mejora en el BER en aproximadamente  $2 \times 10^{-4}$  es conseguida. Esto se debe a que no solo se transmite una parte de los símbolos Q-PSK y los otros bits son codificados en la posición donde están los símbolos QPSK, lo que le hace robusto frente al ruido del canal.

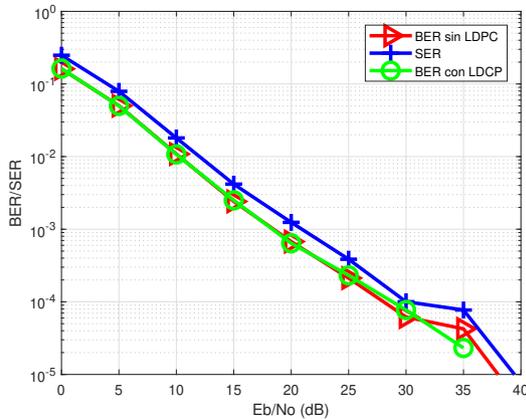


Figura 4. BER y SER para sistema con y sin LDPC

## 6. Conclusiones

La implementación de un sistema de transmisión OFDM-IM en el contexto de la tecnología 6G, tanto con y sin el uso de codificadores LDPC, ha sido abordada mediante simulación numérica, esta simulación ha permitido evaluar el rendimiento del sistema revelando que no existe una mejora significativa para este tipo de señal multiportador como lo aseguran. Un estudio más profundo respecto a otros canales con desvanecimiento selectivo serán necesarios para evaluar de mejor manera esta modulación y poder establecer sus ventajas en estos canales.

## Referencias

- [1] Eren, T., & Akan, A. (2021). Null subcarrier index modulation in OFDM systems for 6G and beyond. *Sensors*, 21(21), 7263. doi: 10.3390/s21217263.
- [2] Colcha Hernández, I. M. (2022). Redes 6G empoderadas por superficies inteligentes reconfigurables. *Trabajo de Integración*, 1–53.
- [3] Milwer, M. B. (2006). Análisis de códigos de detección y corrección de errores en sistemas de comunicaciones inalámbricas. *Trabajo de Grado*, 1–50. Consultado: 27 de junio de 2023.
- [4] Moya Osorio, D. P., et al. (2022). Towards 6G-Enabled Internet of Vehicles: Security and Privacy. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 82–105. doi: 10.1109/OJ-COMS.2022.3143098.
- [5] Yuan, Y., Zhao, Y., Zong, B., & Parolari, S. (Año). Potential Key Technologies for 6G Mobile Communications.
- [6] Xu, S. (2022). Bandwidth research based on OFDM-IM system. En *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, pp. 1036–1043. doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918959.
- [7] Lacalle Marcos, G. (Año). Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Evaluación e Implementación de LTE-A/5G-NR para Aplicaciones Industriales Time-Critical.
- [8] Wang, Q., Cai, S., Chen, L., & Ma, X. (2021). Códigos Convolucionales Semi-LDPC: Construcción y decodificación de lista con ventanas de baja latencia. Disponible en: [www.onlinedoctranslator.com](http://www.onlinedoctranslator.com)
- [9] Yoon, E., Kwon, S., Yun, U., & Kim, S. Y. (2021). LDPC Decoding with Low Complexity for OFDM Index Modulation. *IEEE Access*, 9, 68435–68444. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077256.
- [10] Mohan, J., Gupta, A., Jaypee Institute of Information Technology University, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uttar Pradesh Section. SP/CS Joint Chapter, y Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC): 07-09 March 2019, Jaypee Institute of Information Technology, NOIDA*.
- [11] RF Research Group. (Año). *White Paper on RF Enabling 6G-Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum*. [En línea]. Disponible en: <http://urn.fi/>
- [12] Han'guk T'ongsin Hakhoe, IEEE Communications Society, Denshi Joho Tsushin Gakkai (Japan). Tsushin Sosaieti, y Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). *ICTC 2020: the 11th International Conference on ICT Convergence: "Data, Network, and AI in the Age of 'Untact'" : October 21-23, 2020, Ramada Plaza Hotel, Jeju Island, Korea*.
- [13] Wang, Q., Cai, S., Chen, L., y Ma, X. (2021). *Semi-LDPC Convolutional Codes: Construction and Low-Latency Windowed List Decoding*.

- [14] Kim, K. H. (2023). *Low-Complexity Suboptimal ML Detection for OFDM-IM Systems*. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(3), 416–420. doi: 10.1109/LWC.2022.3229002.
- [15] Lin, C. T., Wu, W. R., y Liu, C. Y. (2015). *Low-Complexity ML Detectors for Generalized Spatial Modulation Systems*. *IEEE Transactions on Communications*, 63(11), 4214–4230. doi: 10.1109/T-COMM.2015.2469781.