

# Análisis de la modulación multiplexación por división de frecuencia generalizada

## Analysis of generalized frequency division multiplexing modulation

Jorge Luis Blanco-Orta<sup>1</sup>, María del Carmen Guerra-Martínez<sup>2</sup>, Francisco Reinerio Marante-Rizo<sup>3</sup>

---

*Fecha de recepción: 11 de mayo, 2022*

*Fecha de aprobación: 22 de agosto, 2022*

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C; Marante-Rizo, F.R. Análisis de la modulación multiplexación por división de frecuencia generalizada. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 158-169.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6201>

1 Emisora Municipal Radio Mariel. Cuba. Correo electrónico: jorgeluisbo@nauta.cu

 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>

2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. Correo electrónico: mariagm@tele.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>

3 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. Correo electrónico: marante@tele.cujae.edu.cu.

 <https://orcid.org/0000-0003-3277-1371>

## Palabras clave

GFDM; OFDM; 6G.

## Resumen

En el presente artículo se hace una investigación de la modulación Multiplexación por División de Frecuencia Generalizada (GFDM) y su influencia para mejorar la estructura de la capa física, teniendo en cuenta las ventajas inherentes que presenta para el desarrollo de nuevas tecnologías. Se establece una comparación con la modulación Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), utilizada en la comunicación móvil de cuarta generación (4G). Definiendo las características que diferencian a cada una de las señales, así como los beneficios para la arquitectura de red, las tecnologías habilitadoras y por ser una modulación que puede solucionar problemas en sistemas masivos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). La investigación se realiza con el propósito de lograr una mayor transmisión de datos, por ser esta una tecnología clave, que afrontará problemas similares en futuros sistemas y mejorar la flexibilidad de la sexta generación (6G).

## Keywords

GFDM; OFDM; 6G.

## Abstract

In this article, an investigation is made of the Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) modulation and its influence to improve the structure of the physical layer, taking into account the inherent advantages it presents for the development of new technologies. A comparison is made with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation, used in the fourth generation (4G) mobile communication. Defining the characteristics that differentiate each of the signals, as well as the benefits for the network architecture, the enabling technologies and for being a modulation that can solve problems in massive multiple input multiple output (MIMO) systems. The research is carried out with the purpose of achieving greater data transmission, as this is a key technology that will face similar problems in future systems and improve the flexibility of the sixth generation (6G).

## Introducción

En este siglo XXI, se ha experimentado un creciente desarrollo en la industria de las telecomunicaciones debido a la gran demanda que existe por parte de los usuarios para adquirir una mayor calidad en la transmisión y mejoras en los servicios de la red. Esto ha provocado por parte del sector de las comunicaciones inalámbricas la búsqueda de nuevas estrategias y tecnologías que permitan la coexistencia de los viejos y nuevos servicios en el espectro radioeléctrico. Con un tránsito interesante desde la primera generación (1G, por sus siglas en inglés) hasta la quinta generación (5G, por sus siglas en inglés), en el que se aprecia que cada nueva generación de tecnología acelera aún más la llegada de nuevos dispositivos y servicios según sus requerimientos de conexión, planteando nuevos escenarios en el uso de tecnologías móviles.

La 5G ya alcanza 1000 veces más capacidad que la 4G, con una latencia de 1 ms y una velocidad de hasta 10 Gb/s [1], lo que ha permitido cambiar por completo el panorama y la industria de los servicios en la nube, del entretenimiento y la comunicación. Aun así, las

industrias de las comunicaciones no se han detenido en su afán de alcanzar nuevos niveles de calidad de la señal y una mayor eficiencia del espectro radioeléctrico, en interés de hacer más flexible la capa física para el desarrollo de la sexta generación (6G, por sus siglas en inglés) [2].

Con la 6G, no solo se incrementarán las capacidades de las redes actuales, sino también habrá un aumento de los requisitos y escenarios de uso, incluyendo: banda ancha móvil mejorada (eMBB, por sus siglas en inglés), comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC, por sus siglas en inglés), y comunicaciones ultra fiables de baja latencia (URLLC, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el escenario de aplicación que se ha previsualizado para las redes 6G posee retos donde la modulación OFDM podría tener limitaciones. El requerimiento de OFDM de preservar la ortogonalidad entre subportadoras individuales es esencial para la comunicación máquina a máquina (M2M, por sus siglas en inglés). Dada la necesidad de bajo consumo de potencia que influye en forma negativa en el proceso de sincronización, este procedimiento no es posible con la modulación OFDM [2,3]. Otra desventaja del sistema OFDM es la alta radiación fuera de banda (OOB, por sus siglas en inglés) que resulta de la forma rectangular del pulso [4]. Debido a estas deficiencias, OFDM puede satisfacer los requerimientos de la 6G de forma limitada. En este contexto la modulación por Multiplexación por División de Frecuencia Generalizada (GFDM, por sus siglas en inglés) está concebida para la modulación de bloques independientes, donde cada bloque consiste en un número de subportadoras y símbolos. Los símbolos de datos pertenecientes a las subportadoras son filtros con un prototipo que es desplazado circularmente en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Es una modulación que presenta grandes ventajas en relación a los requisitos que se esperan pueda cumplir la 6G [5].

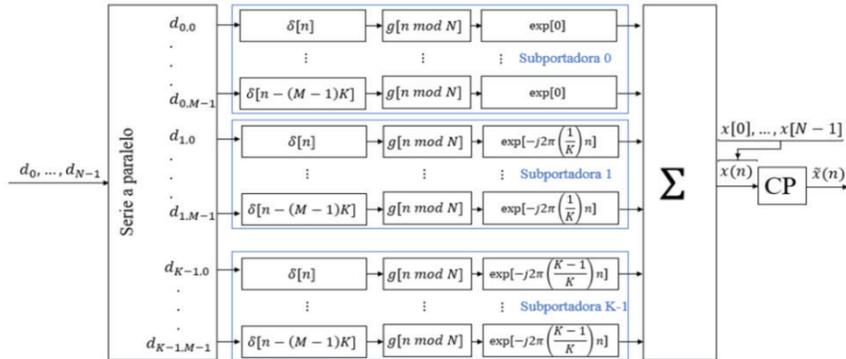
Con la propuesta de solución mediante la utilización de la modulación GFDM, por ser una alternativa de esquema multiportadora, se puede ofrecer una mayor flexibilidad en la estructura para la 6G. Además, proporciona una mejor compartición del espectro, dándole solución a mucho de los problemas que se puede presentar en el despliegue de esta nueva generación de la telefonía móvil, dentro de un entorno con una alta movilidad.

## Metodología

La investigación que se propone en este artículo es un análisis que recoge los conceptos, evolución y despliegue de la modulación GFDM, donde se estableció el siguiente orden de etapas: modelo matemático de GFDM, matriz de transmisión A, receptor GFDM, inserción de prefijo cíclico en GFDM y simulación. Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta algunas limitantes que se pueden encontrar en el futuro despliegue de un sistema con tecnología 6G, como es el caso de los problemas relacionados con aplicaciones inteligentes que utilizan la inteligencia artificial (IA, por sus siglas en inglés) y aprendizaje de máquinas (ML, por sus siglas en inglés). Mediante este procedimiento se presenta la principal contribución de este artículo, con el objetivo de desarrollar una investigación y posible desarrollo de esta modulación, por sus numerosos beneficios, que se relacionan con los desafíos que puedan presentar las nuevas generaciones de telefonía móvil, por ser la modulación más acorde a las nuevas exigencias. La mayoría de los artículos utilizados se encuentran indexadas en la base de datos de la IEEE, permitiendo de esta manera lograr un mayor nivel de profundidad dentro de cada etapa de elaboración del artículo.

## Modelo matemático de GFDM

La GFDM está basada en la modulación de bloques independientes que están compuestos de un número de subportadoras y de subsímbolos. Estos bloques son modulados mediante bancos de filtros compuestos por un pulso prototipo desplazado de manera circular en tiempo y frecuencia [6]. De esta forma evita transmitir menor OOB, permitiendo un uso más eficiente del espectro y una mayor flexibilidad en entornos multiusuario, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de bloques del modulador GFDM. Fuente: [4]

El modulador recibe el vector de  $N$  elementos  $\vec{d}$ , el cual se descompone en  $K$  subportadoras con  $M$  subsímbolos cada una. El vector resultante  $\vec{d}$  contiene  $N = K M$  elementos en el que el elemento  $d_{k,m}$  corresponde con el dato transmitido en la subportadora  $k$  del subsímbolo  $m$  del bloque de elementos.

$$\vec{d} = (\vec{d}_0^T, \dots, \vec{d}_{M-1}^T)^T \text{ con } \vec{d}_m = (d_{0,m}, \dots, d_{K-1,m})^T \quad (1)$$

Cada subsímbolo pasa por un banco de filtros compuesto por el pulso utilizado para transmitir cada dato desplazado circularmente en tiempo. Antes de esto, cada subsímbolo se sobremuestra con tasa  $K$  consiguiendo que los datos adyacentes no intervengan en el filtrado [6,7]. Gracias al diseño del filtro prototipo y al sobremuestreo de cada subsímbolo se consigue que cuando se filtra la muestra  $n$  del subsímbolo  $m$  el filtro tenga valor nulo en la posición de las demás  $K - 1$  muestras de los restantes subsímbolos, donde el filtro no tenga valor nulo y se obtenga un valor en las muestras de 0.

En GFDM, como se explica en [4], se utilizan varios filtros prototipos  $[n]$ , mejorando la eficiencia del espectro y con el uso de este filtro tanto en el transmisor como en el receptor mejora el rendimiento de la tasa de errores de bits (BER, por sus siglas en inglés). Con este filtro no debe introducir interferencia entre símbolos, sino que cumple con algunos criterios, uno de ellos es el primer criterio de Nyquist que se relaciona con el espectro de frecuencia de la señal del transmisor con la interferencia entre símbolos, que frecuentemente se trata de un coseno alzado (RC, por sus siglas en inglés), donde el tiempo del filtro RC está representando según la ecuación (2). Determinando  $T$  como el período del símbolo y  $\alpha$  como el factor de roll-off del filtro. Con el dato  $d_{k,m}$ , que es transmitido con el pulso correspondiente, para el índice  $n$  que indica el tiempo discreto, según la ecuación (3), cada pulso  $g_{k,m}[n]$ , es una versión desplazada circularmente en tiempo del pulso  $g_{k,0}[n]$  debido a la operación módulo y una versión desplazada en frecuencia conseguida gracias a la exponencial compleja. Para las muestras transmitidas  $\vec{x} = (\mathbf{x}[\mathbf{n}])^T$  que se obtiene con las suma de todos los símbolos transmitidos, como aparecen en la ecuación (4), una vez obtenido  $\vec{x}$  se añade el prefijo cíclico de  $N_{CP}$  muestras tras el modulador GFDM para producir  $\vec{\tilde{x}}$ , como se explica en [8].

$$g_{RC}(t) = \text{sinc} \left( \frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left( \frac{\pi \alpha t}{T} \right)}{1 - \left( \frac{2 \alpha t}{T} \right)^2} \tag{2}$$

$$g_{k,m}[n] = g[(n - mK) \bmod N] \exp \left[ -j \frac{2 \pi k n}{K} \right] \tag{3}$$

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n] d_{k,m}, n = 0, \dots, N - 1 \tag{4}$$

### Matriz de transmisión A

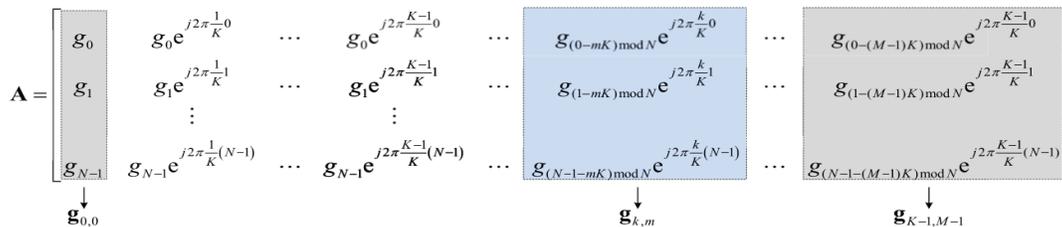
Las operaciones matemáticas de la ecuación (4), usualmente se utilizan de manera matricial. Definiendo una matriz de transmisión A de tamaño KM x KM de manera que la ecuación (4) se puede reformular como:

$$\vec{x} = A \vec{d} \tag{5}$$

La estructura de la matriz A queda de la siguiente forma:

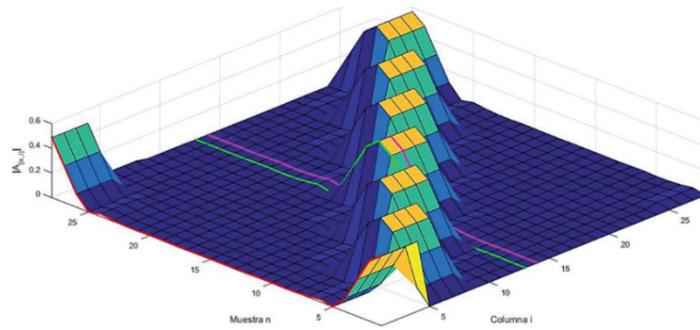
$$A = (\vec{g}_{0,0} \dots \vec{g}_{k-1,0} \quad \vec{g}_{0,1} \dots \vec{g}_{k-1,M-1}) \tag{6}$$

En esta matriz las columnas son la versión desplazada circularmente en tiempo y en frecuencia de la primera columna  $\vec{g}_{0,0}$  que agrupan los K pulsos encargados de transmitir cada k muestras del primer subsímbolo. Situando los K pulsos transmisores de las k muestras del segundo subsímbolo y así sucesivamente hasta tener M bloques de K pulsos transmisores [9,10]. Donde cada agrupación de K pulsos realiza la elevación en frecuencia correspondiente. El pulso k de cada agrupación se elevaría a la frecuencia  $\frac{k-1}{K}$ . De este modo, se divide el espectro en K bandas de manera que cada muestra del subsímbolo M se sitúa en la banda k correspondiente, quedando construida la matriz A con M bloques de k pulsos cada uno [11], como se representa en la figura 2.



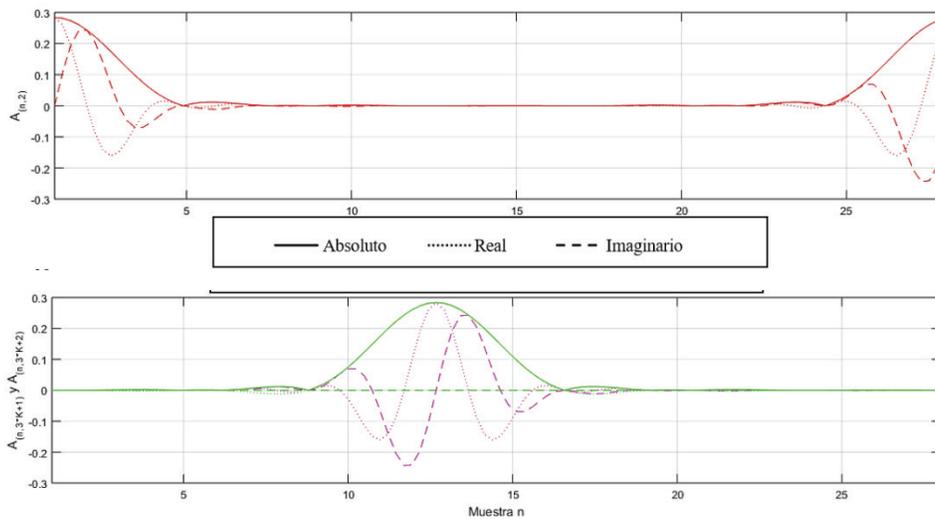
**Figura 2.** La estructura de la modulación GFDM para la matriz A. Fuente: [11].

Para la mejor comprensión de esta matriz se han realizado las siguientes representaciones tomando unos valores de M = 7 para los bloques y de K= 4 pulsos cada uno. Teniendo en cuenta la simulación de la señal GFDM que se realizó en [4,12] mediante el software MATLAB. En la simulación se observó que el resultado era el deseado en la señal que se obtiene ya que representa el valor absoluto de la matriz de transmisión y los pulsos de filtros, como se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Valor absoluto de la matriz de transmisión. Fuente: [4].

Además, los filtros desplazados de  $M$  bloques de  $K$  como se muestra en la figura 3. A continuación, se explicarán los pulsos indicados en color rojo, verde y magenta, que se ejemplifica en la figura 4.



**Figura 4.** Representación de tres pulsos de la matriz de transmisión. Fuente: [4].

Donde se puede observar que el pulso rojo filtra las muestras del primer subsímbolo y se hace 0 para los valores donde están situadas las siguientes. En este ejemplo sería en la posición 1, siendo nulas las demás muestras con valor  $n = mK + 1$ ,  $m = 1, \dots, M-1$ . Por otra parte, tanto el pulso verde como el magenta se encargan de transmitir el mismo subsímbolo, en este caso la tercera muestra de los mismos ( $n = 3K + 1 = 13$ ), pero se observa que su composición en parte real e imaginaria es distinta. Esto es debido a que cada uno está situado a una frecuencia distinta [4]. Para este caso particular se tiene que el pulso verde corresponde con el primero del bloque de  $K$  pulsos, es decir, el pulso  $k = 1$ . Sustituyendo en (3) se obtiene:

$$g_{k=1,m=3}[n] = g[(n) \bmod N] \exp [0] \quad (7)$$

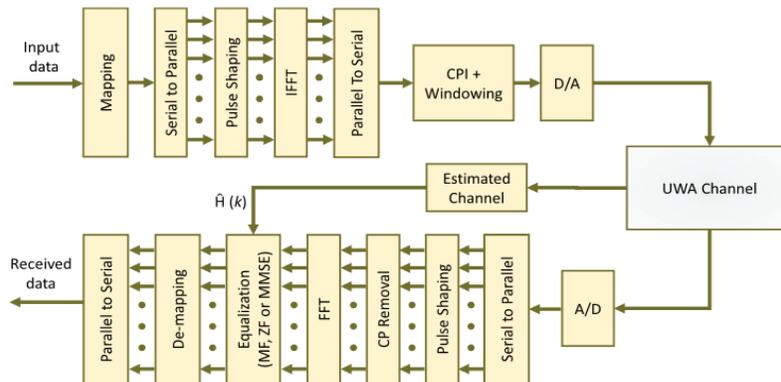
Es decir, el pulso verde es el pulso prototipo desplazado en el tiempo, pero no en frecuencia. Es por ello que su parte imaginaria tiene un valor nulo. No obstante, el pulso magenta es el segundo del bloque, es decir,  $k = 2$ . Aplicando (3) como se hizo en (7) se tiene un desplazamiento en frecuencia [13]. Lo que refleja que, aunque ambos pulsos tienen la misma respuesta en valor absoluto y se encargan de transmitir la posición de la muestra del símbolo, el resultado es distinto debido a la elevación en frecuencia.



de recepción y, por lo tanto, no es necesario un bloque de ZF teniéndose directamente  $\vec{\hat{d}} = \mathbf{B}\vec{y}$ , donde finalmente los símbolos estimados  $\vec{\hat{d}}$  son demapeados para obtener la secuencia de bits en el receptor [14-15]. En MMSE la matriz  $\mathbf{B}$  que se obtiene es:

$$\mathbf{B}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{R}_w^2 + \mathbf{A}^H\mathbf{H}^H\mathbf{H}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^H\mathbf{H}^H \quad (11)$$

Donde  $\mathbf{R}_w^2$  es la matriz de covarianza del ruido. En la evolución del sistema se encuentra el diagrama en bloque para la transmisión y la recepción de GFDM, que se muestra en la figura 6.



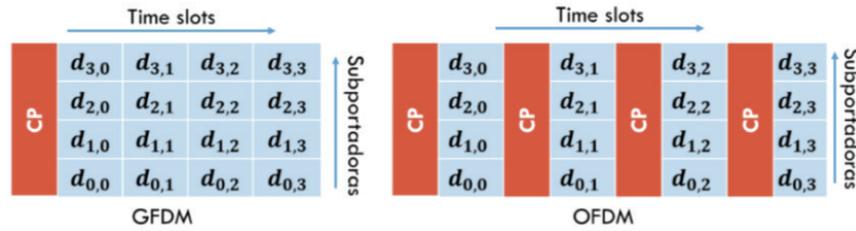
**Figura 6.** Bloques del sistema de transmisión y recepción GFDM. Fuente: [16].

Con esta estructura la GFDM tiene un mejor desempeño con el estándar de modulación de amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés), logrando mayor eficiencia con casi todas las condiciones no ortogonales, permitiendo estar libre de interferencias autogeneradas, minimizando los problemas generados de la singularidad con la matriz de modulación cuando se emplea un número par de subportadoras y subsímbolos, lo que ayuda a bajar las emisiones OOB y disminuye la complejidad de la implementación [16,17].

La principal propiedad que permite diferenciar la GFDM de la OFDM es la posibilidad de dividir información dada en las dimensiones de tiempo y frecuencia en  $K$  subportadoras y  $M$  subsímbolos. Esto logra adaptar el espectro a los requisitos existentes, configurando la señal GFDM para cubrir una porción del ancho de banda con un elevado número de subportadoras como en OFDM. El sistema OFDM puede producir alta radiación OOB y una menor eficiencia en ancho de banda en comparación con GFDM [1,18], debido a que el sistema OFDM utiliza un CP por símbolo. Por su capacidad la GFDM puede hacer más flexible la estructura, haciendo frente a los diferentes requisitos, ya que con esta modulación es posible diseñar la estructura de tiempo-frecuencia para que coincida con las limitaciones de tiempo para las aplicaciones de baja latencia.

### Inserción de prefijo cíclico en GFDM

El paquete de datos en la GFDM solo requiere un CP por bloque de símbolos transmitidos. La figura 7 presenta la estructura de un paquete de datos GFDM donde los símbolos de datos sobre cada subportadora se filtran a través de un filtro pasabanda bien localizado, con la finalidad de limitar la ICI [19]. La utilización del prefijo cíclico aporta eficiencia espectral y reduce la duración total de la trama, lo que favorece a las comunicaciones de baja latencia y como resultado un menor procesamiento de la señal. En GFDM el uso del prefijo cíclico se vuelve más eficiente que en OFDM, al insertar un único prefijo cíclico por cada símbolo completo [11].

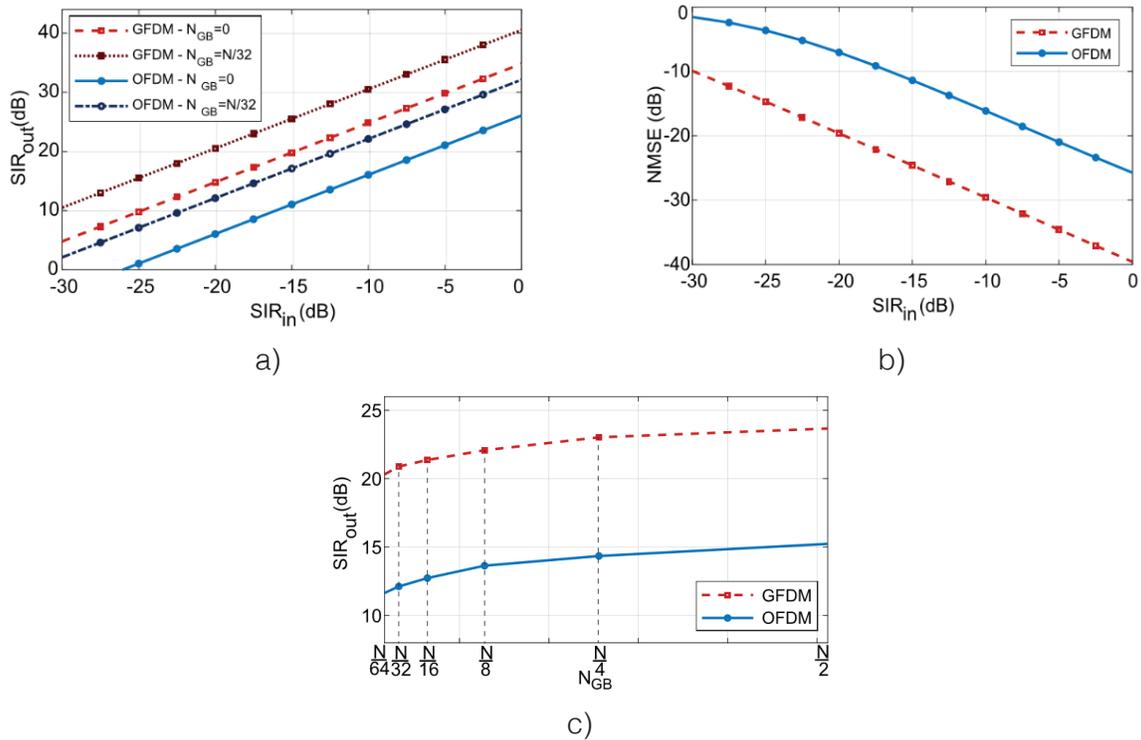


**Figura 7.** Comparación del prefijo cíclico entre GFDM y OFDM. Fuente: [4]

Con esto se logra la creación de tramas con duración más flexible, para que sean utilizadas en aplicaciones que requieran una baja latencia, logrando tramas más cortas. Por eso, para las comunicaciones donde el tiempo de transmisión no es crítico, se pueden utilizar todos los subsímbolos para transmitir los datos de un usuario específico. Al incrementar el número de símbolos por bloque, se obtiene una pérdida de eficiencia espectral menor para valores más grandes de la longitud del prefijo cíclico. Esto es debido a que el prefijo cíclico está asignado a más ranuras de tiempo.

### Simulación

La GFDM se ha tenido en cuenta para los sistemas de radar, como se analizó en [20], por ser una de las posibles soluciones para mitigar las interferencias internas dentro de un sistema de radar con sistema de comunicación (RadCom, por sus siglas en inglés). La simulación fue desarrollada en un laboratorio, mediante tarjetas de detección de señales, para simular una comunicación simultánea. Fueron medidas para una frecuencia de portadora de 24 GHz, con  $N = 256$  de subportadoras, un número de símbolos con  $M = 32$  y un total de símbolos en la banda ancha con  $B = 113.92$  MHz, donde se tuvieron en cuenta los parámetros como NMSE para ver la recepción de la señal del radar después de ser filtrada en relación con la señal recibida por el radar sin interferencia. Se obtuvieron resultados interesantes para la señal mostrada, como aparece en la figura 8 a), la señal reconstruida por OFDM y GFDM para los radares, con determinados valores diferentes de radio para la señal con interferencia ( $SIR_{in}$ , por sus siglas en inglés), se observa que la interferencia dentro de radar OFDM, genera una mayor emisión OOB. En la figura 8 b), se muestra la interferencia después del proceso filtrado  $SIR_{out}$  proveniente de los radares, donde el radar de GFDM presenta una  $SIR_{out}$  mejor con un aproximado de 9 dB en relación con el radar OFDM, donde se adicionó una banda guarda de ( $N_{GB} = N / 32$ ), desde donde se determinó dos radares para la  $SIR_{in}$  con la misma banda guarda, lo que demostró que OFDM se le generaba más interferencia que en el radar GFDM, sin bandas de guarda. Lo que determinó que los valores de  $SIR_{out}$  que se utilizó en el radar de OFDM, requiere más banda guarda. Por eso en la figura 10 c), se comparó la  $SIR_{out}$  para la versión de la guarda de la banda ancha, se compararon ambos radares para ( $SIR_{in} = -20$  dB), donde se puede ver que el radar GFDM solo requiere  $N_{GB} = N / 64$  para que  $SIR_{out} = 20$  dB y el radar OFDM requiere al menos  $N_{GB} = N / 2$ , para que  $SIR_{out} = 15$  dB. El mayor número de subportadoras de banda guarda en OFDM causa no solo el decrecimiento de la eficiencia espectral en los datos de la transmisión, sino también una disminución de la capacidad de resolución dentro del radar. De hecho, la interferencia intrínseca causada por la no ortogonalidad de las subportadoras GFDM se mitiga completamente mediante el uso de la técnica de procesamiento de GFDM propuestas. Para un entorno multiusuario, donde puede ocurrir interferencia entre usuarios en canales adyacentes, el radar GFDM presenta menos interferencia entre sistemas que el radar OFDM. Por lo tanto, el radar GFDM requiere una banda de protección más estrecha y tiene una mejor resolución de alcance que el radar OFDM, lo que hace que la forma de onda GFDM sea un mejor candidato para los nuevos sistemas de comunicaciones.



**Figura 8.** Comparación de GFDM y OFDM. a) Variación de NMSE en la recepción de la señal. b) Variación post-filtrado de SIR. c) Variación de post-filtrado de SIR en función de la guarda de la banda ancha para SIR<sub>in</sub> = -20 dB.

## Conclusiones

Con la modulación GFDM se mejoran las capacidades en el enlace descendente, aportando eficiencia temporal, ya que introduce un solo CP para transmitir la información y en el enlace ascendente se consigue una mayor eficiencia espectral, logrando una menor radiación OOB, que permite un uso más eficiente del espectro. Todo ello se relaciona con los desafíos que los sistemas con tecnología 6G están tratando de superar, además de una mejor transmisión en entornos multiusuario tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

La modulación GFDM aporta una mayor flexibilidad a la hora de su construcción, mediante los parámetros de diseño M y K que incluye, logrando una transmisión basada en bloques que utilizan la inserción de CP. Esto permite que la GFDM se ajuste a distintos anchos de banda para distintas aplicaciones y que permitan dividir la banda disponible en un número de usuarios que se adapte a los escenarios. Lo que puede ayudar al desarrollo de una nueva estructura más flexible para la capa física, logrando con esta configuración se pueda cubrir una mayor área que con la modulación OFDM.

La interferencia intrínseca causada por la no ortogonalidad de las subportadoras GFDM se puede mitigar completamente mediante el uso de la técnica de procesamiento de radar GFDM propuesta. También se verificó que, en entornos multiusuario, donde puede ocurrir interferencia entre usuarios en canales adyacentes, el radar GFDM presenta menos interferencia entre sistemas que el radar OFDM. Por lo tanto, el radar GFDM requiere una banda de protección más estrecha y tiene una mejor resolución de alcance que el radar OFDM. Por eso es una opción atractiva para sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas

en inglés), por lo que es posible diseñar su estructura de manera adaptativa para que coincida con las limitaciones de tiempo y latencia del sistema, facilitando el salto de las comunicaciones inalámbricas hacia nuevas tecnologías.

## Referencias

- [1] A. Hilario-Tacuri, "Computational Tool for the Evaluation of Waveform Candidates of Beyond 5G and 6G Systems," 2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532648.
- [2] P. V. Saicharan, V. B. S. I. Dutt, C. Venkat Rao and S. Sohith, "Performance Analysis of Clipping Techniques for 5G NR higher-order UPMC-QAM Systems," 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2021, pp. 242-249, doi: 10.1109/ICCES51350.2021.9489103.
- [3] U. Farooq and A. Miliou, "Channel Equalization for converged OFDM-Based 5G mm-wave A-RoF System at 60 GHz," 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 2021, pp. 1263-1267, doi: 10.1109/CCWC51732.2021.9375831.
- [4] B. de los Ríos, "Estudio de formas de onda candidatas para comunicaciones 5G: Generación y análisis de señal GFDM," Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [5] V. Nivetha and V. Sudha, "BER Analysis of GFDM System Under Different Pulse Shaping Filters," 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2021, pp. 53-56, doi: 10.1109/WiSPNET51692.2021.9419396.
- [6] W. Indah Sari, A. Fitriani Isnawati and K. Ni'amah, "Performance Analysis GFDM Using MMSE Equalization in Audio Transmission," 2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), 2021, pp. 141-145, doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530797.
- [7] Z. Li et al., "Preliminary On-Orbit Performance Test of the First Polarimetric Synchronization Monitoring Atmospheric Corrector (SMAC) On-Board High-Spatial Resolution Satellite Gao Fen Duo Mo (GFDM)," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, doi: 10.1109/TGRS.2021.3110320.
- [8] H. -Y. Wang, C. -H. Cheng, B. Su and G. -R. Lin, "QAM-GFDM of Dual-Mode VCSEL Mixed 28-GHz MMW Carrier for Fiber-Wireless Link," in Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 19, pp. 6076-6084, Oct.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3096246.
- [9] Y. Guo, X. Liu, X. Liu and T. S. Durrani, "Energy-Efficient Resource Allocation for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in GFDM Cooperative Communications," in *IEEE Networking Letters*, doi: 10.1109/LNET.2022.3141489.
- [10] K. Choi, "FD-FBMC: A Solution for Multicarrier Full Duplex Cellular Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 617-621, Feb. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3028375.
- [11] Y. Li, K. Niu and C. Dong, "Polar-Coded GFDM Systems," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149299-149307, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947254.
- [12] H. -F. Wang, F. -B. Ueng and C. -T. Chiang, "High Spectral Efficiency and Low Error Rate MIMO-GFDM for Next-Generation Communication Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 1, pp. 503-517, Jan. 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3127912.
- [13] V. Kishore, S. P. Valluri, V. M. Vakamulla, M. Sellathurai, A. Kumar and T. Ratnarajah, "Performance Analysis Under Double Sided Clipping and Real Time Implementation of DCO-GFDM in VLC Systems," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 33-41, 1 Jan.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3026381.
- [14] E. N. O. Herawati, A. F. Isnawati and K. Ni'amah, "Analysis of GFDM-OQAM Performance Using Zero Forcing Equalization," 2021 *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, 2021, pp. 135-140, doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530809.
- [15] N. Sharma et al., "Aerial Base Station Assisted Cellular Communication: Performance and Trade-off," in *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, doi: 10.1109/TNSE.2021.3052984.
- [16] M. Murad, I. A. Tasadduq and P. Otero, "Towards Multicarrier Waveforms Beyond OFDM: Performance Analysis of GFDM Modulation for Underwater Acoustic Channels," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 222782-222799, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043718.
- [17] Y. Liu, X. Zhu, E. G. Lim, Y. Jiang and Y. Huang, "A Semi-Blind Multiuser SIMO GFDM System in the Presence of CFOs and IQ Imbalances," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 48-63, Jan. 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3093476.

- [18] T. Levanen, O. Tervo, K. Pajukoski, M. Renfors and M. Valkama, "Mobile Communications Beyond 52.6 GHz: Waveforms, Numerology, and Phase Noise Challenge," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 128-135, February 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000185.
- [19] R. Mulyawan, R. Averly, I. Syafalni, N. Sutisna and T. Adiono, "Dynamic Pilot Allocation for Channel Estimation in High-Mobility OFDM Receiver," *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEIC51217.2021.9369750.
- [20] J. B. Sanson, D. Castanheira, A. Gameiro and P. P. Monteiro, "Non-Orthogonal Multicarrier Waveform for Radar with Communications Systems: 24 GHz GFDM RadCom," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128694-128705, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940299.