

Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de radio-sobre-fibra con características de la red 5G

Analysis of dispersive effects in a radio-over-fiber scenario with 5G network characteristics

Dúmar Hidalgo Monsalve¹

Byron Medina Delgado²

Dinael Guevara Ibarra³

Ferney Amaya Fernández⁴

Jesús Álvarez Guerrero⁵

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.32.8960>

RESUMEN

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la transmisión de señales OFDM, basadas en el estándar 5G New Radio, con el fin de establecer qué tanto los impedimentos óptico-inalámbricos afectan la comunicación en un escenario de transmisión de radio-sobre-fibra. Con el *software* Matlab se hicieron análisis cualitativo y cuantitativo de las degradaciones en la información debidas a un canal óptico-inalámbrico. Los resultados permitieron demostrar que es posible realizar transmisiones OFDM bajo los lineamientos de 5G New Radio garantizando bajas tasas de error de bits en el rango de 0 a 20 km de fibra óptica, designado para aplicaciones 5G New Radio de baja latencia.

Palabras clave: 5G Nuevo Radio, dispersión, radio-sobre-fibra, OFDM, canal, transmisión.

ABSTRACT

In this research work, a 5G-based OFDM signal transmission is performed in order to analyze to what extent optical-wireless impairments affect the communication in a Radio-over-Fiber transmission scenario. By using MATLAB software, both qualitative and quantitative analysis of the information degradations due to an optical-wireless channel were performed. Simulations results allowed it to be demonstrated that it is possible to carry out OFDM transmissions under New Radio guidelines ensuring low bit error rates in the 0 to 20 km fiber link range allocated for low-latency 5G New Radio applications.

Keywords: 5G New Radio, Dispersion, Radio-over-fiber, OFDM, Channel, Transmission.



Cómo citar este artículo: D. Hidalgo, B. Medina, D. Guevara, F. Amaya and J. Álvarez. "Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de radio-sobre-fibra con características de la red 5G". *Ingeniare*, vol. 18, no. 32, pp. 11-25, Junio 2022.

¹ Ingeniero electrónico, Universidad Francisco de Paula Santander. dumarhmm@ufps.edu.co

² Doctor en Ciencias, Universidad Francisco de Paula Santander. byronmedina@ufps.edu.co

³ Doctor en Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander. dinaelgi@ufps.edu.co

⁴ Doctor en Ingeniería Área Telecomunicaciones, Universidad Pontificia Bolivariana. ferney.amaya@upb.edu.co

⁵ Candidato a Doctor en Ingeniería, Universidad Libre de Colombia. jesus.alvarezg@unilibre.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El porcentaje de población que emplea medios digitales como principal fuente de información aumenta cada día. Aplicaciones de uso masivo como la transmisión de video, la realidad aumentada y los servicios de almacenamiento en la nube son cada vez más demandados, lo cual representa un reto directo para la actual infraestructura de telecomunicaciones [1], [2].

La quinta generación de infraestructuras de comunicaciones 5G nace como consecuencia del actual perfil de consumo de información. 5G brinda un panorama en el que todo estará digitalizado, medido y automatizado, impulsando así un nuevo modelo de conectividad global que requiere altas velocidades de transmisión, cobertura total, latencias muy bajas y un amplio ancho de banda para funcionar [3] a photonic based simple and robust method for generating millimeter waves applicable in 5G access fronthaul is presented. Besides generating of the mm-wave signal in the 60 GHz frequency band the radio over fiber (RoF).

5G New Radio (NR) es el punto de partida en la estandarización global de las redes 5G propuesto por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en 2016 [4]. Como respuesta a dicho estándar, en los últimos años se han estudiado diversas arquitecturas de red con el fin de soportar la interfase de radio 5G. Entre éstas, la arquitectura cableada FTTH (*Fiber-to-the-Home*), la cual se ha desplegado en diversas partes del mundo basándose en una topología de punto a punto, que permite llegar al usuario directamente por medio de enlaces de fibra óptica, ofreciendo un gran ancho de banda. No obstante, los usuarios actuales prefieren la conectividad inalámbrica por su significativa flexibilidad, a pesar de su aún limitada cobertura [3], [5].

Sin embargo, radio-sobre-fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*) es una propuesta de arquitectura de red que promete ampliar la cobertura de radio y soportar los altos requerimientos de 5G NR [6], aprovechando las prestaciones tanto del medio óptico (baja atenuación, gran ancho de banda, entre otros), como del inalámbrico (movilidad, cobertura, entre otros); además, brinda ventajas al sistema en cuanto a centralización de equipos, menor complejidad, flexibilidad operacional e inmunidad a interferencia electromagnética [7].

Además de arquitecturas de red se han evaluado técnicas de modulación apropiadas para NR. La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha ganado protagonismo en los últimos años por su uso en diversas tecnologías como WiFi y WiMax [8] [9]. OFDM fue adoptado por el 3GPP como principal candidato a forma de onda para NR [10]. Con OFDM y el espectro de radiofrecuencias (RF) se pretende ofrecer altas tasas de transmisión y brindar un esquema de transmisión más versátil que el de LTE [10], [13].

A pesar de que RoF junto con las señales OFDM y el espectro de radiofrecuencias ofrecen grandes ventajas, existen retos por superar que limitan su desempeño.

En el canal óptico existen los efectos de propagación de la fibra en los que se destaca la dispersión cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), que afecta los sistemas ópticos ocasionando ensanchamiento en el tiempo de los pulsos que viajan a lo largo del canal, provocando que sus componentes espectrales lleguen a destiempo. Por otro lado, el canal inalámbrico exhibe altas tasas de error de bits y aporta degradaciones importantes en la información por parte de efectos como la dispersión por multitrayectoria o el *shadowing* [14], [15].

El aporte de ambos canales en conjunto genera degradaciones indeseadas en las transmisiones OFDM, que se ven reflejadas como Interferencia Interportadora (ICI, *Intercarrier Interference*), dando como resultado una información inexacta al usuario [9]it can be mitigated by using Nyquist-I pulse shaping filters. In OFDM-based systems, we assess the exponential linear (EL.

En investigaciones relacionadas como la realizada en [3], se presenta un método fotónico simple para generar señales milimétricas, que se usan para transmitir señales OFDM en sistemas de radio-sobre-fibra y aplicarlas en redes de acceso 5G. A su vez, en [4] se demuestra que OFDM es una opción formidable para cubrir los requisitos de 5G NR, de acuerdo con indicadores claves como flexibilidad, eficiencia espectral y compatibilidad con MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), entre otros.

En este artículo se presentan los resultados de simulaciones en Matlab de la transmisión de una señal OFDM a través de un canal óptico-inalámbrico, con el fin de analizar cómo los efectos de propagación inherentes a éste limitan el desempeño de un sistema RoF con características 5G. Los resultados obtenidos permiten demostrar que es posible transmitir señales OFDM en el rango óptico comprendido entre 0 y 20 km, que se haya estandarizado para aplicaciones 5G de baja latencia en [16].

En el título 2 de este artículo se describe brevemente el principio de funcionamiento de los sistemas RoF, en el tercero se explican las etapas del escenario simulado, posteriormente se presentan y discuten los resultados obtenidos, y finalmente se destacan las conclusiones más relevantes, de acuerdo con los resultados obtenidos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

RoF es una buena solución para extender la cobertura del acceso inalámbrico, utilizando la fibra óptica. También se considera una de las propuestas más prometedoras para el despliegue de soluciones de red de alta capacidad que soporten gran cantidad de servicios inalámbricos, tanto de 4G como de 5G en conjunto [4], [6].

Los sistemas RoF se implementan generalmente de acuerdo con una topología de fibra-inalámbrica (FiWi, *Fiber-Wireless*) (Figura 1). En la conexión de bajada (DL, *Downlink*), la información en forma de

señales RF se transporta por el canal óptico desde una oficina central (CO, *Control Station*) hasta estaciones base (BS, *Base Station*), desplegadas masivamente por el casco urbano, y se retransmite hasta el usuario a través del medio inalámbrico para facilitar su acceso. En el enlace de subida (UL, *Uplink*), la transmisión se lleva a cabo de forma similar desde las BS hasta la CO [6], [17].



Figura 1. Escenario de aplicación de RoF

Fuente: elaboración propia.

Para cumplir los requerimientos de la red fronthaul 5G NR, en las recomendaciones ITU-T, serie G, se establece que los enlaces de fibra entre la CO hasta las BS no deben sobrepasar los 20 km de distancia para servicios de baja latencia y se recomienda el uso de fibra monomodo estándar (SMF, *Single-Mode Fiber*), debido a su baja atenuación [16].

Paralelamente, RoF casi siempre combina dos tecnologías claves: la técnica de transmisión OFDM, que es un caso especial de transmisión multiportadora y consiste en enviar información dividiendo su ancho de banda total en un número determinado de subportadoras ortogonales [18], y la Modulación de Intensidad con Detección Directa (IM/DD, *Intensity Modulation/Direct Detection*), que se emplea para transformar las señales OFDM al dominio óptico y transportarlas por la fibra para su posterior transmisión por el canal inalámbrico. Usando estas dos tecnologías se mejora considerablemente la eficiencia espectral y se logran altas tasas de transmisión [19].

En un diagrama básico de transmisión IM/DD OFDM (Figura 2) inicialmente la información en forma de bits se convierte de serie a paralelo y se prepara para ser mapeada, de acuerdo con un esquema de modulación determinado. Posteriormente, se emplea un bloque de Transformación Rápida Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) para generar las subportadoras ortogonales OFDM, cuyo tamaño representa el número de subportadoras totales que contendrá la señal OFDM.

Luego, la información se serializa para agregar un prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*), que se emplea para evitar ICI, la cual es típica en transmisiones de señales OFDM, debido a su alta sensibilidad a errores de sincronización, como se explica en [20] they still present a huge problem for the fifth-generation standards. This paper explores the tradeoff between the length of the cyclic prefix and the performances of the OFDM system. It also studies the effect of carrier frequency offset (CFO). Posteriormente, la señal OFDM se modula en RF por un Oscilador Local (LO, *Local Oscillator*), antes de transmitirla por el medio óptico.

Al emplear IM/DD, la salida óptica generada por un láser se modula en intensidad por la señal de información OFDM a través de un dispositivo de modulación externa, Mach Zehnder (MZM). Luego, la señal resultante se envía a través del enlace de fibra y, finalmente, es detectada por un fotodetector en la etapa de recepción de la BS.

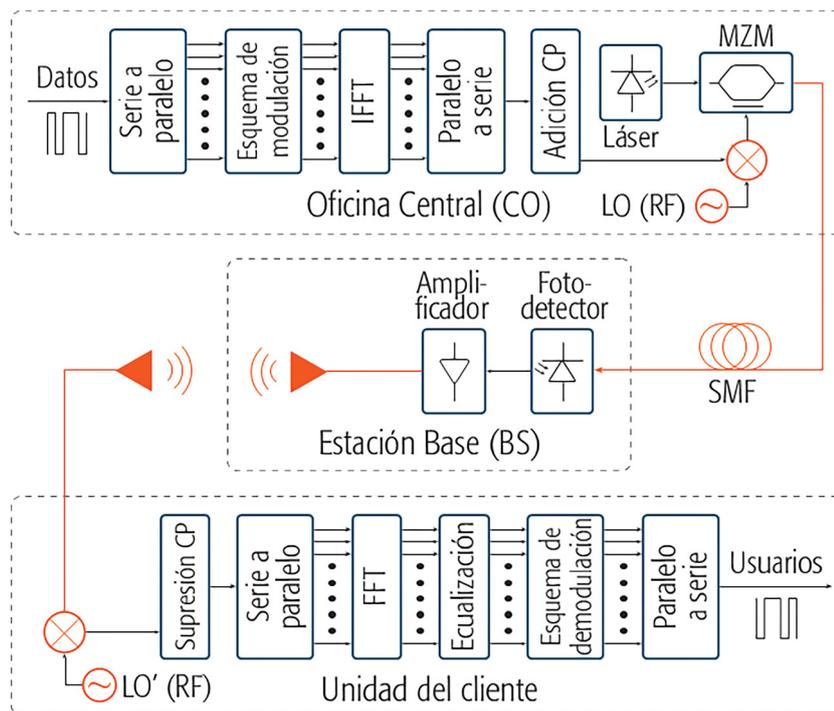


Figura 2. Transmisión IM/DD OFDM

Fuente: elaboración propia.

Por último, la señal detectada se amplifica y retransmite por la interfase de aire hasta alcanzar la etapa de recepción de la unidad del cliente, en la que se obtiene la información aplicando el proceso inverso, explicado en la etapa de transmisión OFDM, incluyendo normalmente un bloque adicional de ecualización adaptativa [21], [22].

3. METODOLOGÍA

Para la simulación del escenario RoF se tomó como base un modelo de transmisión OFDM IM/DD (Figura 2), empleando la caja de herramientas de comunicaciones y procesamiento de señales de Matlab. En la sección 3.1 se explica el proceso de generación de la forma de onda OFDM, en la sección 3.2 se especifican los parámetros seleccionados para el canal óptico y en la sección 3.3 se describe el modelo de canal inalámbrico empleado.

3.1 Forma de onda OFDM

Debido a los altos requerimientos de 5G NR no es posible asignar sólo una configuración de onda para satisfacer todo el espectro de probables aplicaciones. Por esta razón, para NR se incluyeron varios formatos de modulación, entre los que se encuentran BPSK y QPSK para la Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y 16QAM, 64QAM y 256QAM correspondientes a la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) en [10].

La escogencia del esquema de modulación tiene implicaciones importantes en cuanto a la velocidad de bits y el alcance de la transmisión. Un esquema de mayor orden permite el envío de más símbolos simultáneos, pero es más propenso a sufrir por ruido o interferencia durante la transmisión [23].

En este escenario se optó por limitar la velocidad de bits loggable con el fin de garantizar un alcance mayor en las transmisiones de la etapa óptico-inalámbrica. Por esta razón se escogió el esquema de modulación QPSK, en lugar de los esquemas QAM de mayor orden aceptados en NR. A su vez, se descartó BPSK debido a que QPSK permite duplicar la tasa de bits posibles mientras se ocupa el mismo ancho de banda ofrecido por BPSK. Los criterios para la selección de esquemas de modulación se abarcan más detalladamente en [21].

Se seleccionaron la forma de onda OFDM y las señales portadoras RF debido a que se encuentran establecidas en el estándar NR [10], [11]. Para generar formas de onda OFDM existe una gran variedad de numerologías, al igual que un rango de frecuencias operativas más amplio que en LTE, con el fin de soportar un número mayor de servicios. Con base en lo anterior, en [4] se relacionan dichas numerologías con varios rangos de frecuencias para llevar a cabo un diseño de forma de onda apropiado, como se muestra a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Numerologías para 5G NR

Espaciado entre subportadoras (kHz)	Tamaño bloque IFFT N_f	Duración del CP (μ s)	Tamaño del CP N_{CP}	Rango de frecuencias (GHz)
15	4.096	4,69	288	≤ 6
30	4.096	2,35	288	≤ 20
60	4.096	1,17	288	≤ 40
120	4.096	0,57	288	> 40
240	4.096	0,29	288	> 40

Fuente: elaboración propia.

El escenario de simulación se planteó con el fin de analizar las limitaciones de las redes de acceso 5G futuras, que están pensadas para ocupar las bandas de frecuencias más altas. Con base en esto, se escogió una frecuencia portadora RF de 50 GHz, con un tamaño de CP de 288 de 0,29 μ s de duración, un tamaño de bloque IFFT de 4096 y un espaciado entre subportadoras OFDM de 240 kHz.

3.2 Canal óptico

El canal óptico se simuló mediante el modelo de propagación óptico de la ecuación 1, el cual gobierna el comportamiento de los pulsos ópticos en una fibra SMF, en la que A representa la amplitud de la envolvente óptica, L la longitud de la fibra y t el tiempo [24].

$$j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = - \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1)$$

Para el modelo empleado en las simulaciones sólo se tuvo en cuenta la CD, como consecuencia de los parámetros de dispersión de segundo orden β_2 y la dispersión de tercer orden β_3 , los cuales se obtuvieron a partir de los valores de λ y D , establecidos en la recomendación ITU-T G.652 sobre las características de los canales de fibra SMF [25]. Los valores correspondientes a dichos parámetros se muestran a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de las constantes del canal óptico

Constante	Valor
Longitud de onda de operación	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
Parámetro de dispersión	$D = 17 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$
Dispersión segundo orden	$\beta_2 = -21.682 \text{ (ps)}^2 \cdot \text{km}^{-1}$
Dispersión tercer orden	$\beta_3 = 0.117 \text{ (ps)}^3 \cdot \text{km}^{-1}$

Fuente: elaboración propia.

Al emplear el modelo óptico mencionado se pudo omitir el uso de los dispositivos ópticos ilustrados en la Figura 2, permitiendo liberar la transmisión de las componentes de ruido agregadas por dichos dispositivos y así poder enfocar los resultados hacia el análisis de las degradaciones aportadas sólo por el canal de comunicaciones.

3.3 Canal inalámbrico

La obtención de los resultados se enfocó principalmente en las degradaciones aportadas por el canal óptico. Por lo tanto, el canal de tipo inalámbrico se modeló de forma básica, como una función de distribución gaussiana, como se expresa en la ecuación 2, presentada en [26], donde μ es la media, con un valor de 0 en aplicaciones de telecomunicaciones y σ^2 representa la varianza que toma valores diferentes, dependiendo de la relación señal a ruido (SNR).

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Por medio de este modelo se varió la potencia de ruido del canal para alterar la información y poder evaluar hasta qué punto sería posible lograr una buena transmisión para diferentes escenarios. Para esto se calculó el valor de la SNR para la señal OFDM, de acuerdo con la ecuación 3.

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10} k + 10 \log_{10} \frac{N_d}{N_f} \quad (3)$$

En esta ecuación se tuvieron en cuenta el número de bits por símbolo $k = 2$ para QPSK, el número de subportadoras total N_f y útiles $N_d = N_f - N_{cp}$, así como el factor E_b / N_0 (relación entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia de ruido), que tomó valores entre 0 y 30 dB para las simulaciones que implicaban la variación de la SNR.

Para la adición de ruido se calculó la potencia de la señal OFDM, nombrada X , por medio de $P = \overline{|X|^2}$ para posteriormente calcular la varianza $\sigma^2 = P/10^{SNR/10}$. Una vez calculada la varianza, se generó una señal de ruido usando la función de Matlab, la cual retorna una matriz de números aleatorios normalmente distribuidos, dependiendo de la longitud de la señal X . De esta forma se obtuvo la señal de salida alterada $Y = X + Z$ en función de la variación de E_b / N_0 .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se enfocaron en mostrar cómo la transmisión de una señal OFDM se ve afectada por el canal óptico-inalámbrico en un escenario RoF. En la sección 4.1 se analizan las degradaciones debidas al canal óptico y en la sección 4.2 se adicionan las perturbaciones ocasionadas por el canal inalámbrico.

co. Se emplearon herramientas de análisis cualitativo como diagramas de constelación y ojo, y de tipo cuantitativo como EVM (*Error Vector Magnitude*) y BER (*Bit Error Rate*), para cualificar y medir el canal híbrido mencionado.

4.1 Perturbaciones debidas al canal óptico

Con el fin de evaluar las degradaciones en la transmisión debidas al canal de fibra óptica, más adelante se presentan diagramas de constelación de la transmisión de una señal OFDM a lo largo de distancias de fibra de 1, 20, 60 y 100 km (Figura 3). Las gráficas obtenidas fueron soportadas con mediciones de EVM para cada escenario.

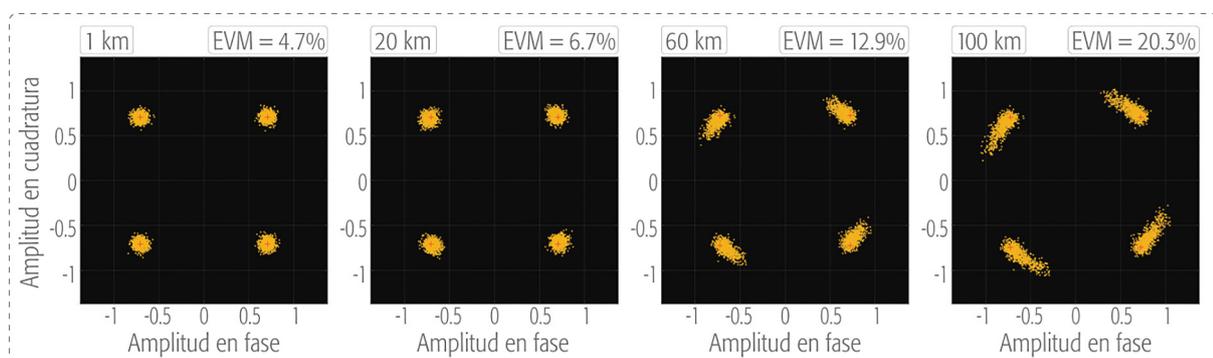


Figura 3. Diagramas de constelación para el análisis cualitativo del canal óptico.

Fuente: elaboración propia.

En los diagramas de constelación se puede apreciar una respuesta en frecuencia irregular en forma de ruido gaussiano, común a todos los diagramas de constelación, el cual se debe a irregularidades durante el proceso de recepción RF [27]. Además, se evidencia un Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO, *Carrier Frequency Offset*), que se aprecia como rotación de los símbolos transmitidos en el plano. El CFO se hizo más evidente usando distancias de fibra de 60 y 100 km. Esto ocasiona que se pierda información en el borde del espectro en frecuencia de la señal OFDM, debido a un desfase de frecuencia entre la señal óptica recibida y el oscilador local, lo cual provoca ICI en las transmisiones OFDM, ocasionando un bajo rendimiento de BER y EVM [28], [29].

Con base en estos resultados se puede evidenciar que el efecto de distorsión predominante en las transmisiones simuladas para distancias de fibra superiores fue el CFO, mientras que no hubo presencia de dispersión de símbolos alrededor de los puntos de constelación al aumentar la distancia de la fibra, efecto característico de la Dispersión Cromática (CD). En la bibliografía especializada, entre ellas en [21], este comportamiento se atribuye a la alta inmunidad de la técnica OFDM frente a la Dispersión Cromática, como consecuencia de la ortogonalidad entre subportadoras.

Adicionalmente, se muestran valores de EVM que representan alteraciones de amplitud y fase en los símbolos enviados, cuyo porcentaje máximo aceptado para garantizar transmisiones de buena calidad con QPSK para NR está fijado en 17,5% en [11]. Así, la transmisión a través de 100 km de fibra resultó en un bajo desempeño de EVM, mientras que para 1, 20 y 60 km se evidenció una afectación creciente a medida que aumentaba la distancia, aunque manteniendo valores por debajo del límite aceptado, garantizando una transmisión óptima.

A continuación, mediante diagramas de ojo, se puede observar la degradación de la información debida a la fibra en el dominio del tiempo (Figura 4).

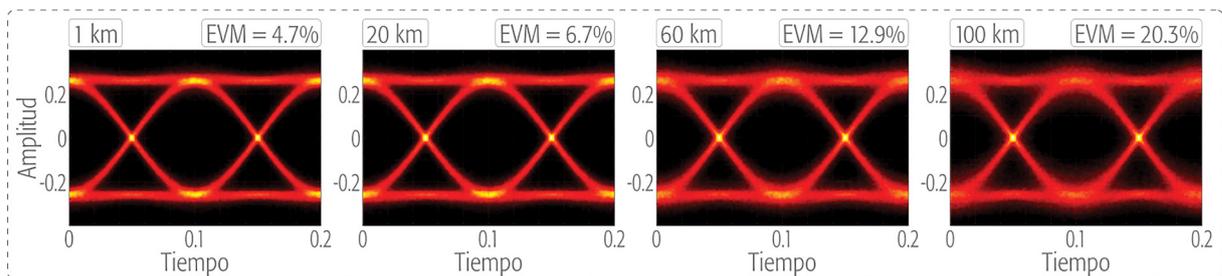


Figura 4. Diagramas de ojo para el análisis cualitativo del canal óptico.

Fuente: elaboración propia.

Al igual que en los diagramas de constelación, la deformación para las distancias de 1 y 20 km es despreciable, debido a que la cantidad de distorsión y la abertura del ojo permanecieron casi indistinguibles para ambos casos. Dicho efecto aumentó a los 60 km, en el que se observa una ligera disminución en la altura del ojo, debido a la distorsión aportada por el canal, mientras que la transmisión a 100 km muestra un nivel de distorsión aún leve, pero suficiente para arrojar un mal desempeño de EVM, indicando que el CFO tiene una incidencia negativa importante en la información enviada, aunque poco significativa cuando se analiza mediante diagramas de ojo.

4.2 Perturbaciones debidas al canal óptico-inalámbrico

En esta sección se presenta el impacto del canal óptico-inalámbrico en la transmisión usando las distancias de fibra empleadas en la sección 4.1, ante la variación de E_b/N_0 entre 1 dB y 30 dB.

Para evaluar el valor máximo de E_b/N_0 , que garantiza una transmisión óptima para distintos tramos de fibra óptica, se realizó un análisis cuantitativo de los efectos del canal óptico-inalámbrico, de acuerdo con las variaciones de la potencia de ruido. A continuación, se muestran las curvas BER vs. E_b/N_0 obtenidas para distancias de 1, 20, 60 y 100 km de fibra (Figura 5).

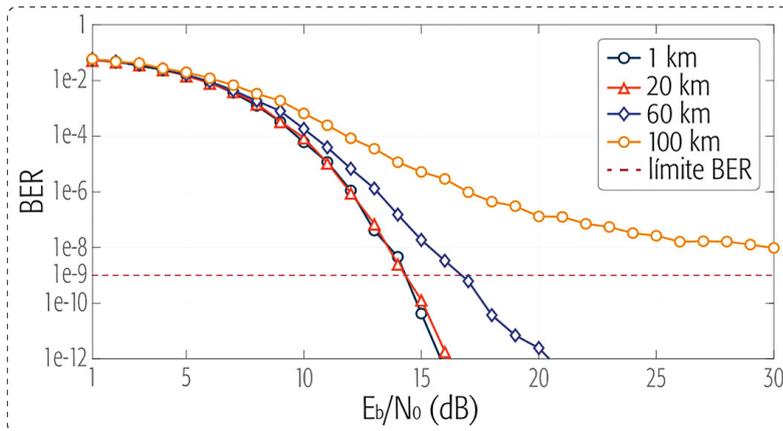


Figura 5. Curvas de BER vs. E_b/N_0 (dB) para el análisis cuantitativo.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con [30], el mínimo BER permitido para garantizar una transmisión correcta en telecomunicaciones ronda el orden de 10^{-9} . Las transmisiones para todas las distancias mantuvieron valores de BER similares hasta ~ 7 dB. Por un lado, las transmisiones a 1 y 20 km exhibieron un desempeño similar, alcanzando el mínimo BER permitido a ~ 14 dB, lo cual indica que las degradaciones aportadas por el canal en un rango de 20 km no son significativas. Para lograr el mismo propósito a lo largo de 60 km se requirió de +3 dB que en los escenarios anteriores. Por el contrario, la transmisión a través del enlace de 100 km mostró una respuesta descendiente hasta un valor de ~ 25 dB, a partir del cual presentó tendencia a estabilizarse a un BER de $\sim 10^{-8}$, sin antes llegar al límite aceptado.

Con el fin de analizar cualitativamente los efectos del canal óptico-inalámbrico se realizaron diagramas de constelación para mostrar el límite máximo de E_b/N_0 , que garantiza una transmisión correcta de la señal OFDM (Figura 6). La distancia de fibra empleada fue de 20 km para evaluar el escenario de aplicación de servicios de baja latencia para NR, mencionado en el título 2.

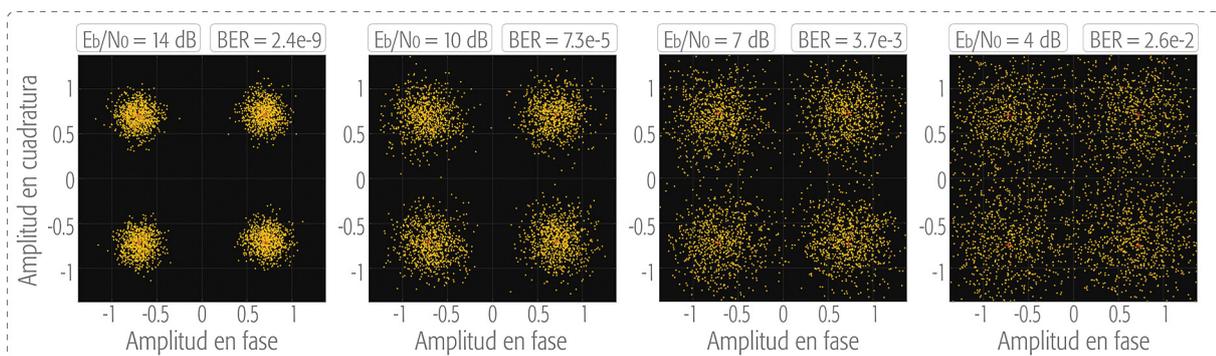


Figura 6. Diagramas de constelación para el análisis del canal óptico-inalámbrico.

Fuente: elaboración propia.

Los diagramas de constelación permiten visualizar que el desempeño de la transmisión mejora a medida que el valor de E_b/N_0 aumenta, lo cual está sustentado de forma cuantitativa por las medidas de BER. Así, para $E_b/N_0 = 4, 7$ y 10 dB, los símbolos sufrieron degradaciones muy abruptas, arrojando un valor de BER alto e imposibilitando la transmisión, a menos de que se incluyan alternativas de ecualización en la etapa de recepción para recuperar la información enviada. En la Figura 6, para $E_b/N_0 = 14$ dB, se soportan de forma cualitativa los resultados de la Figura 5 para 20 km, demostrando que la transmisión es correcta sólo si los valores de E_b/N_0 son mayores que ~ 14 dB, pues se logran medidas de BER cercanos a 10^{-9} , que permiten que los símbolos permanezcan cercanos a los puntos de constelación.

De acuerdo con los diagramas de ojo, cuando E_b/N_0 toma valores de 4 y 7 dB, la calidad del ojo presenta niveles de distorsión muy altos, que reflejan obtención de información errónea tras la transmisión (Figura 7).

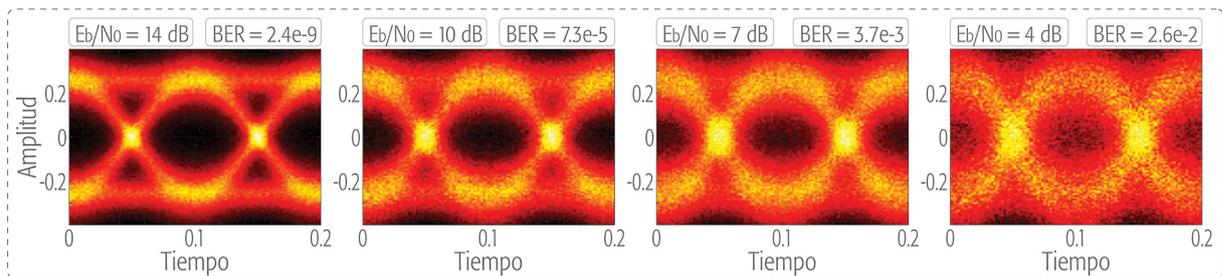


Figura 7. Diagramas de ojo para el análisis del canal óptico-inalámbrico.

Fuente: elaboración propia.

Una vez en $E_b/N_0 = 10$ dB la apertura del ojo es más clara, pero aún existe distorsión suficiente para descartar un posible escenario de transmisión. Sin embargo, en la Figura 7, para $E_b/N_0 = 14$ dB, se evidencia que es posible transmitir la señal OFDM para 20 km de fibra, pues se obtienen valores de BER cerca de los límites recomendados, a pesar de que existe clara distorsión en el cruce por cero y la apertura del ojo no es totalmente clara.

5. CONCLUSIONES

Se simuló un escenario de RoF en el que se evaluaron las degradaciones de un canal óptico-inalámbrico sobre la transmisión de una señal OFDM, diseñada con base en las numerologías y rangos de frecuencias establecidos en el estándar 5G NR.

Durante las transmisiones OFDM se demostró que la degradación más importante obtenida a través del medio óptico fue el Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO), mientras que la Dispersión Cromática no tuvo incidencia significativa en el desempeño del sistema, debido a la característica principal de ortogonalidad de la forma de onda OFDM, la cual le atribuye una alta inmunidad frente a dicho efecto.

El CFO, que se reseñó en la sección 4.1 como rotación de símbolos en la constelación, alteró el de-sempeño de la Magnitud del Error Vectorial (EVM). Se demostró, entonces, que las transmisiones a 1, 20 y 60 km se pueden realizar para NR ofreciendo valores de EVM aceptables, mientras que el CFO tuvo un impacto negativo importante en el desempeño de EVM a 100 km, arrojando medidas fuera del límite estandarizado fijado en 17,5%. En este último escenario, la ortogonalidad entre subportadoras fue alterada significativamente, generando un nivel de ICI suficiente para imposibilitar la transmisión.

Con base en la sección 4.2, en la que se incluyeron las degradaciones aportadas por el canal inalámbrico, se demostró que las transmisiones en el rango entre 0 y 20 km, sugerido para servicios de baja latencia para NR, presentaron un desempeño casi invariable y arrojaron valores óptimos en el desempeño de BER. También se determinó que la transmisión de señales OFDM para distancias de fibra entre dicho rango se pueden llevar a cabo de forma exitosa, siempre y cuando el parámetro E_b/N_0 tome valores superiores a 14 dB. Por el contrario, se determinó que las simulaciones a 100 km de fibra no brindan escenarios de transmisión viables para el tipo de señal que se generó, ya que no se obtuvieron resultados de BER por debajo del límite aceptado de , cuyo valor es necesario para garantizar fidelidad en la calidad de la información enviada.

Para suprimir el efecto del CFO, evidenciado en las simulaciones, y poder ampliar el alcance de las transmisiones, se propone como trabajo futuro la inclusión de bloques de ecualización en la etapa de recepción de la señal OFDM. Una alternativa adicional es insertar componentes de sincronización y estimación del canal empleando subportadoras piloto, usadas en la transmisión OFDM para ayudar a mitigar dicho efecto. Así mismo, se sugiere mejorar el enfoque del canal inalámbrico adicionando modelos de canal de dispersión Rayleigh o Rician de respuesta selectiva o plana, con base en los estándares recomendados por la ITU-T. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de aumentar el rendimiento del sistema por medio de la adición de más antenas en la transmisión OFDM o incrementando el orden del esquema de modulación.

REFERENCIAS

- [1] C. Singhal y S. De, *Resource Allocation in Next-Generation Broadband Wireless Access Networks*. Hershey PA: IGI Global, 2017.
- [2] I. Al Ridhawi, S. Otoum, M. Aloqaily, Y. Jararweh y T. Baker (2020). Providing secure and reliable communication for next generation networks in smart cities, *Sustainable Cities and Society* (56). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102080>.
- [3] S.E. Alavi, M.R.K. Soltanian, I.S. Amiri, M. Khalily, A.S.M. Supa'at y H. Ahmad (2016). Towards 5G: A Photonic Based Millimeter Wave Signal Generation for Applying in 5G Access Fronthaul, *Scientific Reports* (6) 19891. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep19891>.

- [4] A.A. Zaidi, R. Baldemair, H. Tullberg, H. Björkegren, L. Sundström, J. Medbo, C. Kilinc e I. da Silva (2016). Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements, *IEEE Communications Magazine* (54) 11. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600336CM>.
- [5] A. Escallón-Portilla, V. Ruiz-Guachetá y J. López-Perafán (2020). Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF, *TecnoLógicas* (23) 47. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22430/22565337.1391>.
- [6] Z. Ghassemlooy, W. Popoola y S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*, 2da ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [7] M.-O. R. Oswaldo, C.-M. M. Arturo, P.-L.G. Adolfo y S.-F.C. Arturo (2015). Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica, *Ingeniería, Investigación y Tecnología* (16) 4. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.010>.
- [8] M.R. Devi (2015). Effective BER performance for Spectrum- and Energy- Efficient OFDM Based Wi-MAX System (4) 8. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15693/ijaist/2015.v4i8.45-51>.
- [9] D. Zabala-Blanco, G. Campuzano y C.A. Azurdia-Meza (2017). BER reduction in OFDM systems susceptible to ICI using the exponential linear pulse, *Proceedings of the 2017 IEEE 24th International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing, Intercon 2017*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/INTERCON.2017.8079689>.
- [10] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *NR; Physical channels and modulation*, France: 3rd Generation Partnership Project, (TS 38.211), 2020.
- [11] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*, France: 3rd Generation Partnership Project, (TS 38.104), 2020.
- [12] S.Y. Lien, S.L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y.L. Hsu y H.Y. Wei (2017). 5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access, *IEEE Communications Magazine* (55) 6. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601107>.
- [13] R. Chakraborty, N. Kumari, M. Mousam y A. Mukherjee (2018). The Future of 5G and Millimeter Waves, *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (Iceca)*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474584>.
- [14] H.-C. Yang, *Introduction to Digital Wireless Communications*, 1ª. ed. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [15] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. USA: Elsevier Inc., 2013.
- [16] International Telecommunication Union (ITU), *5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context*, United Nations: International Telecommunication Union, (G.Sup66), 2019.
- [17] V. Mishra, R. Upadhyay y U.R. Bhatt (2018). A Review of Recent Energy-Efficient Mechanisms for Fiber-Wireless (FiWi) Access Network, *Advances in Intelligent Systems and Computing* (563). [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6872-0_51.
- [18] U. Choudhary y V. Janyani (2020). OFDM over optical fiber, *Optical and Wireless Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering* (546). [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6159-3_34.

- [19] T. Zhang, H. Ji, Z. Ghassemlooy, X. Tang, B. Lin y S. Qiao (2020). Spectrum-Efficient Triple-Layer Hybrid Optical OFDM for IM/DD-Based Optical Wireless Communications, *IEEE Access* (8). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964792>.
- [20] S. Atoui, N. Doghmane y S Affi (2019). Blind frequency offset estimator for OFDM systems, *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)* (17) 6. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i6.11957>.
- [21] H. Asplund et al., *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments*. London: Elsevier Ltd., 2020.
- [22] V.A. Thomas, M. El-Hajjar y L. Hanzo (2016). Millimeter-Wave Radio over Fiber Optical Upconversion Techniques Relying on Link Non-Linearity, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (18) 1. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2409154>.
- [23] T. Chapman, E. Larsson, P. von Wrycza, E. Dahlman, S. Parkvall y J. Sköld, *HSPA evolution: The fundamentals for mobile broadband*. United Kingdom: Elsevier Ltd., 2015.
- [24] S.K. Turitsyn, J.E. Prilepsky, S.T. Le, S. Wahls, L.L. Frumin, M. Kamalian y S.A. Derevyanko (2017). Nonlinear Fourier transform for optical data processing and transmission: advances and perspectives, *Optica* (4) 3. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000307>.
- [25] International Telecommunication Union (ITU-T). *Characteristics of a single-mode optical fibre and cables*, United Nations: International Telecommunication Union, (ITU-T G.652), 2016.
- [26] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 5ª. ed. United States of America: Pearson Education Limited, 2014.
- [27] P.T. Shih, C.T. Lin, W.J. Jiang, Y.H. Chen, J.J. Chen y S. Chi (2009). Full duplex 60-GHz RoF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format, *Optics Express* (17) 22. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1364/oe.17.019501>.
- [28] S.R. Moon, I.-K. Hwang, H.-S. Kang, S.-H. Chang, S.-W. Lee y J.K. Lee (2017). CFO compensation method using optical feedback path for coherent optical OFDM system, *Optical Fiber Technology* (36). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.03.017>.
- [29] M. Renfors, X. Mestre, E. Kofidis y F. Bader, *Orthogonal Waveforms and Filter Banks for Future Communication Systems*, 1ra ed. United Kingdom: Elsevier Ltd., 2017.
- [30] D. Walsh, D. Moodie, I. Mauchline, S. Conner, W. Johnstone y B. Culshaw (2005). Practical bit error rate measurements on fibre optic communications links in student teaching laboratories, *Ninth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics* (9664) 96642I. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1117/12.2207674>.