

Evaluación de desempeño de beamforming para esquemas de modulación QAM y OFDM en enlaces inalámbricos MIMO

Darío Alejandro Estupiñán
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
dario.estupinan@javeriana.edu.co

Rafael Puerta
Ericsson AB
Estocolmo, Suecia
rafael.puerta@ericsson.com

Daniel Jaramillo
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
d-jaramillo@javeriana.edu.co

Abstract—Fixed Wireless Access (FWA) arrives as an alternative to Fiber to the Home services thanks to new 5G cellular networks. It is one of the alternatives for the services offered in the new Integrated Access and Backhaul architecture. These point-to-point links take place generally from a multiple-antenna base station to a single-antenna customer premise equipment in a quasi-static wireless channel. We perform link level simulations with a complete Tx and Rx signal processing chain, to evaluate the performance of OFDM and single carrier QAM in mmWave channels using QUADRIGA. Results from LOS, NLOS, urban, suburban channels and the impact of element malfunctioning in 2D antenna-array transmitters are evaluated.

Index Terms—OFDM, QAM, FWA, 3GPP, performance assessment, MISO, Line of sight.

I. INTRODUCCIÓN

Durante una época sin precedentes para la humanidad, el tráfico mundial de datos ha crecido de una forma increíble, según lo previsto por [1] en 2017 las predicciones entre 2017 y 2023 estaban en casi 8 veces el tráfico de datos del momento, sin embargo, las condiciones actuales de confinamiento durante el año 2020 y las medidas adoptadas por diferentes países han incrementado las exigencias a la infraestructura actual, y, a pesar de ello la infraestructura de telecomunicaciones ha logrado estar acorde a los niveles esperados. No obstante, dicha exigencia se ha incrementado en los últimos meses por lo cual ha sido necesario aprovisionar servicios y anchos de banda cada vez más grandes (e.g. bandas milimétricas), y densificar infraestructura en redes móviles que permita cubrir las necesidades para los sectores de educación, salud, y la industria [2].

Una de las tecnologías móviles que ha permitido cumplir con dichas exigencias es la tecnología 5G que ha contribuido a soportar capacidades altas de tráfico y a reducir los tiempos de implementación para redes de hogares a través de tecnologías de FWA dado que los centros de operación de las personas han cambiado de ubicación hacia áreas residenciales y en algunos casos hacia áreas rurales donde la demanda de servicios de salud y educación se ha hecho evidente y necesaria.

La tecnología FWA (acceso inalámbrico fijo) permite reducir las barreras del mercado y proveer sistemas robustos, flexibles y de gran capacidad [3] no solo en entornos urbanos sino también en áreas donde la implementación de redes cableadas es casi imposible [4].

Es por lo que el presente proyecto de investigación plantea realizar una comparación de desempeño de beamforming para

diferentes esquemas de modulación en enlaces punto a punto en onda milimétrica basados en FWA y así contribuir en los análisis e investigaciones respecto a este tipo de tecnologías totalmente necesarias en momentos donde se exigen capacidades más grandes y flujos de datos limpios y sin interferencias.

II. MARCO TEÓRICO

A. Beamforming

La técnica conocida como beamforming nos permite poder dirigir la energía de radio a través de un canal a un usuario tal como lo manifiesta [5] en la Figura 1 lo cual nos permite ajustar diferentes parámetros como la amplitud y la fase de cada señal transmitida las cuales pueden ser ajustadas en su transmisión en uno o diferentes rayos, de acuerdo al número de antenas empleado, con lo cual es posible incrementar la potencia de la señal hacia el receptor, obteniendo así un mejor desempeño en uplink y downlink.

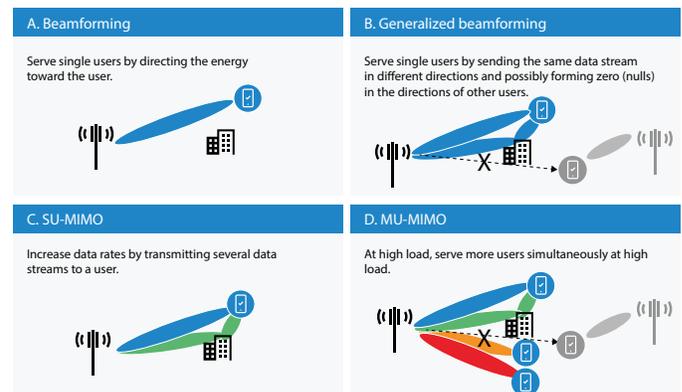


Fig. 1. Gráfica de Beamforming y sistemas MIMO. tomado de: [5]

Sin embargo, es necesario poder tener en cuenta los escenarios donde pueden existir formantes nulas de nuestros radios de transmisión, tal como se aprecia en la figura anterior en Generalized Beamforming (figura: 1).

B. Técnicas MIMO [Múltiples-Entradas-Múltiples-Salidas]

El propósito de estas técnicas (figura: 2) como se mencionó anteriormente es poder mejorar el rendimiento y en efecto la potencia de nuestra señal a transmitir, sin embargo es necesario poder reutilizar los recursos y evitar un crecimiento

desmesurado de recursos para un solo propósito, es por eso que la técnica MIMO nos permite transmitir múltiples datos utilizando el mismo recurso en tiempo y frecuencia donde cada rayo puede ser modificado por Beamforming [5] [6].

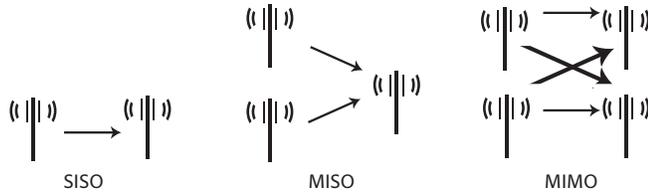


Fig. 2. Configuraciones de técnicas MIMO.

En la figura 2 se pueden observar las configuraciones MIMO más comunes, siendo de interés para este trabajo la configuración MISO.

a) *MISO (Multiple Input - Single Output)*:: En MISO su configuración es de un arreglo de antenas de dos o más en el transmisor y una antena en el receptor, esta técnica permite atender diferentes estaciones terminales de usuario y aplicar precodificación y beamforming para su operación, este esquema es popular dentro de los servicios FWA el cual será utilizado dentro de este trabajo ya que su implementación se está empezando a gestar en todo el mundo desde la concepción de 4G LTE, para nuestro objeto de estudio será desde la perspectiva de onda milimétrica 5G NR.

C. FWA

Uno de los retos demandantes de las tecnologías de comunicaciones es lograr total cobertura en entornos rurales y urbanos con excelente desempeño de la red y desde luego un costo bajo de implementación y de servicio para el usuario, es por lo que dentro de las bondades que ofrece 5G permite lograr este fin entre 10 y 100 veces más capacidad que una red 4G convencional, así como también reducir los costos de implementación de fibra óptica hacia los hogares mediante un enlace inalámbrico hacia los hogares con un CPE 5G/4G LTE. De acuerdo con [7] el propósito de implementación de esta tecnología es “construir sobre lo que ya existe” para optimizar y reducir sus costos de implementación.

Aspectos claves de FWA de acuerdo con [7]:

- Tecnología basada completamente en 3GPP RAN (Radio Access Network).
- Los CPE de exteriores tal como lo menciona [7] “permiten incrementar la eficiencia espectral y aumentar la cobertura del servicio”
- La tecnología de implementación entre estación base y terminal está basada en sistemas MISO (Estación base con arreglo de antenas para cobertura en entornos urbanos y CPE con una sola antena en enlace LOS para lograr aprovechar al máximo la capacidad de esta).

- Al agregar los beneficios de 5G NR nos permite operar con anchos de banda de mayor capacidad e implementar características de 5G definidas en [8]:

Con respecto a las bandas de operación de FWA el desarrollo de este trabajo se realiza con frecuencia central de 26 GHz siendo esta, la frecuencia correspondiente a la banda de uso comercial de 26 GHz en Europa (banda comprendida entre 24.25 GHz y 27.5 GHz).

D. Modulación

En el proceso de transmisión de señales, es necesario adecuarlas para poder transmitirlos, por tanto en esta etapa se codifican los bits a transmitir en palabras codificadas y, ya que la información puede ser llevada en amplitud, frecuencia o fase, existen diversos tipos de modulación, siendo los relevantes para este trabajo:

1) QAM [Modulación de Amplitud en Cuadratura]:

Proceso en el que se descompone una señal en términos de fase y cuadratura con amplitudes correspondientes y se utilizan 2 portadoras seno y coseno respectivamente como dos señales ortogonales, las cuales cada una lleva información de forma independiente, de igual forma como en los casos anteriores existen M puntos posibles en la constelación lo cual le da el orden a esta.

Su fórmula característica está dada por: $S(t) = m_1 \cos w_c t - m_2 \sin w_c t$

a) *Pulse Shaping*:: En los sistemas actuales de comunicaciones, la información digitalmente procesada necesita ser transmitida de forma apropiada en forma analógica; es por eso que se requiere un proceso de mapeo el cual consiste de acuerdo con [9] en mapear los bits de origen a símbolos complejos (puntos de constelación) y mapear los símbolos complejos a trenes de pulsos análogos lo cual nos permite poder reconstruir de forma adecuada la señal en el receptor.

El filtro aplicado para este trabajo es pulso raíz de coseno alzado explicado a continuación:

b) *Pulso raíz de coseno alzado*:: Este filtro se obtiene de la convolución de los filtros de coseno alzado de transmisión y recepción, una de sus características es que permite minimizar al máximo la interferencia entre símbolos. Su fórmula característica es: $h(t) = \frac{2\beta}{\pi\sqrt{T}} \frac{\cos[(1+\beta)\pi t/T] + \sin[(1-\beta)\pi t/T]}{1-(4\beta t/T)^2}$, donde β es el factor *roll-off* y T el periodo de muestreo.

E. OFDM [Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales]

Como se ha mencionado en diferentes secciones de este trabajo, una de las metas a lograr en los sistemas de comunicaciones actuales es obtener el mejor desempeño y capacidad de estos, por tanto, uno de los esquemas de modulación más utilizados en comunicaciones inalámbricas es OFDM el cual

es utilizado en el desarrollo de este trabajo. El principio fundamental de OFDM es dividir una secuencia de datos en diferentes sub-secuencias para ser transmitidas a través de diferentes sub-portadoras.

- Como esquema de modulación de multiportadoras existe un solapamiento de espectro con señales ortogonales es decir el espacio entre portadoras consecutivas que permite que sea siempre la misma e igual al inverso del periodo de cada símbolo. En la figura 3 se puede observar el espectro de una señal OFDM de varias señales en paralelo donde los pulsos rectangulares se convierten en pulsos sinc en el dominio de la frecuencia. Una señal OFDM se puede expresar como: $s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_i \exp [j2\pi (f_c + \frac{i}{T}) t]$.

Donde:

- f_c es frecuencia central.
- T periodo de símbolo.
- d_i símbolo que lleva la información.
- $s(t)$ señal OFDM en tiempo.
- Este esquema que nos permite lograr una alta tasa de transmisión que requiere por supuesto un gran ancho de banda. En su forma de onda permite transformar canales de frecuencia selectivos en canales paralelos tipo flat-fading de acuerdo con lo mencionado en [10].
- Es un esquema que cumple con lo mencionado en FWA (II-C) respecto a la recursividad de implementación y utilizar modulación QAM.
- La larga duración de símbolo en tiempo y los tiempos de guarda incrementan la robustez del sistema frente a efectos multipath e interferencia entre símbolos (ISI) [11].
- Permite una utilización flexible del espectro de frecuencia [11].

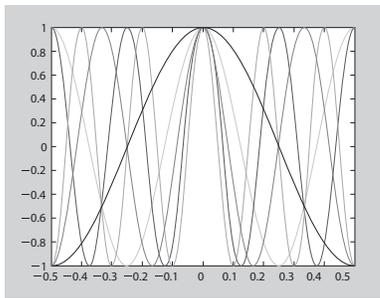


Fig. 3. Ejemplo de 5 portadoras en un símbolo OFDM, tomado de: [12].

a) *Prefijo Cíclico*: Una de las características importantes de OFDM es el prefijo cíclico el cual se caracteriza por ser un intervalo de guarda para eliminar la interferencia entre símbolos del símbolo anterior, esta guarda se crea con una copia del final del símbolo para agregarla al final de este en un ciclo continuo y sobre cada símbolo como se puede observar en la figura 4, las longitudes de este prefijo obedecen a cada numerología definida por la 3GPP. Adicionalmente esta característica permite aumentar la robustez de la señal debido a la reducción de interferencia entre cada símbolo (ver figura

5, y por otra parte una desventaja de este es la reducción de capacidad de datos de la señal ya que se reduce el tamaño de símbolos y por tanto es necesario tener símbolos adicionales para cumplir con la tasa de datos a transmitir [12]. Tal como lo menciona [12].



Fig. 4. Prefijo cíclico y símbolo OFDM, tomado de: [12].

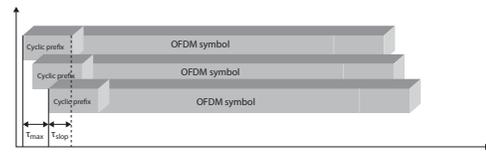


Fig. 5. Ejemplo de solapamiento de símbolos OFDM tomado de: [12].

F. Ruido de Fase

Descrito y representado como una afectación en el dominio de la frecuencia sobre una forma de onda respecto a una frecuencia central (o de portadora) causado por inestabilidad o retardos en el dominio del tiempo (jitter) [13] la cual se manifiesta en un ensanchamiento de la señal respecto a dicha frecuencia central tal como se observa en la figura 6 [14] [15].

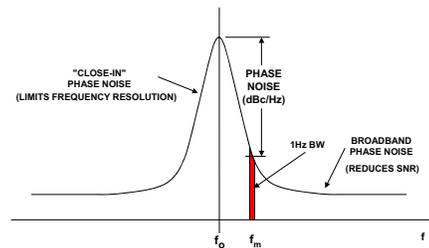


Fig. 6. Espectro de ruido de fase, tomado de: [15].

G. Precodificación MRT

Este esquema de precodificación permite incrementar la ganancia de la señal en la estación base, es aplicada a sistemas MISO (ver figura 7) y aplicada en el desarrollo de este trabajo.

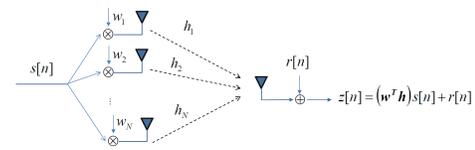


Fig. 7. Esquema precodificación MRT, tomado de: [16].

Su fórmula de aplicación está dada por: $w = \frac{h^*}{\|h\|}$ teniendo en cuenta que el conocimiento del canal está dado en el

transmisor.

A continuación, se presenta la estructura, parámetros y programación empleada para este trabajo.

H. Estructura

Para el desarrollo de este trabajo y su correcto cumplimiento de objetivos, se desarrolla la siguiente estructura para los formatos de modulación empleados (SC-QAM y OFDM) la cual contiene elementos característicos para estos, los cuales serán explicados en las siguientes secciones.

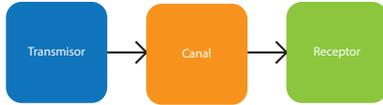


Fig. 8. Estructura Principal.

1) *Parámetros de simulación:* Con el objeto de aprovechar los anchos de banda que ofrecen las bandas de mm-wave se decidió usar el ancho de banda más amplio definido en 3GPP 38.101 [17] 3GPP 38.104 [18] y 38.901 [8]. Para una comparación justa de los esquemas de modulación analizados se tomó la determinación de emplear el mismo ancho de banda (400MHz) definido tanto para SC-QAM como para OFDM en los documentos 3GPP 38.101 [17] 3GPP 38.104 [18] y 38.901 [8], de igual manera se aproximaron los valores de bits procesados a 1Gbit para que los dos sistemas tengan similares características y la comparación realizada sea equitativa.

2) *Parámetros iniciales de simulación OFDM:* Según lo definido en [18] y [19] para un ancho de banda de 400MHz el tamaño de la FFT es de 4096 muestras de las cuales 3168 son subportadoras activas equivalentes a 264 bloques de recursos (resource blocks) con 12 subportadoras cada uno. Teniendo en cuenta el espacio entre ellas (120KHz) se logra cubrir un ancho de banda de 380.16MHz.

Espacio de subportadoras (Subcarrier spacing SCS) [KHz]	120
Tamaño de FFT [muestras]	4096
Frecuencia de muestreo [MHz]	491.52
Subportadoras activas	3168
Ancho de Banda máximo [MHz]	380.16
Formatos de Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Bloques de recursos	264

TABLA I
NUMEROLOGÍA DEFINIDA EN [18] Y [19]

3) *Parámetros iniciales de simulación QAM:* Para lograr una comparación justa entre los dos esquemas de modulación se adecuan los valores de muestras por símbolo así como el valor del factor *roll-off* de nuestro filtro raíz de coseno alzado para garantizar un ancho de banda de 380.16MHz como es usado en OFDM así como también el valor de frecuencia de muestreo del DAC ajustado a valores de hardware comercial tal como el ofrecido en [20].

I. Estructura OFDM

La estructura de este desarrollo se basa en las siguientes etapas con funciones propias de MATLAB[®] así:

- Generación de secuencia binaria.
- Modulación QAM.
- Ruido de fase.
- Precodificación MRT: a la señal generada y procesada, se precodifica de forma manual en frecuencia, aplicando la fórmula: $w = \frac{h^*}{\|h\|}$.
- Modulación OFDM.
- Cuantización DAC y ADC.
- Canal QuaDRiGa: se genera el canal basado en el código de QuaDRiGa [21].
- Ruido Gaussiano (AWGN).
- Demodulación OFDM.

Una vez recuperada la señal se procede a realizar el cálculo de tasa de error de bits *BER* con referencia a la señal original generada.

J. Estructura QAM

Respecto a la estructura anterior, para el caso de QAM se tienen las siguientes particularidades:

- El desarrollo de QAM está realizado completamente en el dominio del tiempo.
- Las etapas de *upsampling*, *pulse shaping*, *downsampling* y normalización se realizaron generando un pulso de raíz de coseno alzado con las funciones propias de MATLAB[®].

Como se mencionó anteriormente, esta implementación está realizada completamente en el dominio del tiempo, en consecuencia, para la etapa de **MRT**, se realizaron pasos adicionales como:

- 1) Convertir la respuesta en frecuencia del canal QuaDRiGa a tiempo, realizar el proceso de la fórmula de MRT mencionada anteriormente.
- 2) Realizar una convolución entre la respuesta impulso del canal (CIR) de cada antena y la señal que se desea transmitir para poder aplicar la precodificación MRT.

III. CANAL MISO

Para el desarrollo de este trabajo, teniendo en cuenta lo mencionado en II-C y, basado en implementaciones reales de aplicación FWA, se considera un canal MISO con diferentes combinaciones en el arreglo de antena del transmisor y una antena receptora.

A. QuaDRiGa

Para tener coherencia con los modelos de canales utilizados por los diferentes organismos de estandarización internacional, se optó por utilizar el desarrollo realizado por el Instituto Fraunhofer para las telecomunicaciones Heinrich Hertz llamado QuaDRiGa [21] o por sus siglas en inglés “QUAsi Deterministic RadIo channel GenerAtor” el cual genera respuestas

de canal realistas y de canales casi estáticos para ser utilizadas en simulaciones de comunicaciones inalámbricas.

Por las diferentes ventajas que ofrece QuaDRiGa [21] se decidió por esta plataforma con la cual podemos garantizar estabilidad y un modelo de canal realista basado en la normatividad y condiciones utilizadas por la industria para las simulaciones realizadas en este trabajo.

B. Respuesta Impulso y Prefijo Cíclico

a) *Respuesta Impulso de Canal QuaDRiGa:* Una vez seleccionada la plataforma y su respectiva integración a la simulación desarrollada, se proceden a generar las respuestas impulso del canal con las cuales para escenarios UMa-LOS (figura 9) se observa que los taps se encuentran concentrados sobre el primer tap (camino LOS) mientras que para el escenario UMa-NLOS (figura 10) se observan varios retardos a lo largo de la respuesta impulso que afectan el desempeño del sistema.

Parámetros QuaDRiGa	
Frecuencia Central [GHz]	28
Uso de parámetros 3GPP	Si
Escenarios 3GPP 38.901	Uma-LOS,Uma-NLOS
Modelo de Antena	3GPP 36.873
Polarización	single-polarized
Transmisor:	1
Receptor:	1
Parámetros de altura y distancia de Antena	3GPP 38.901
Movimiento de terminal móvil	No
Número de tomas instantáneas (snapshots)	1
Muestras (tamaño FFT)	4096

TABLA II
PARÁMETROS DE CANAL QUADRIGA

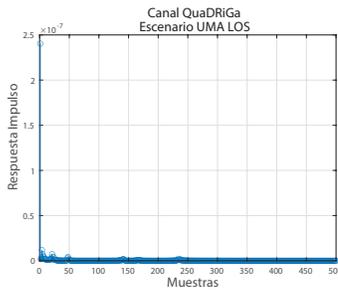


Fig. 9. Respuesta Impulso Canal QuaDRiGa Escenario UMa LOS

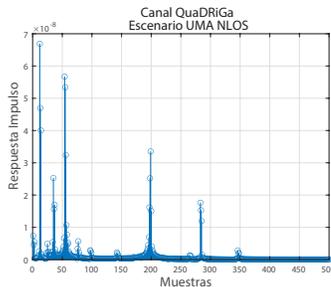


Fig. 10. Respuesta Impulso Canal QuaDRiGa Escenario UMa NLOS

b) *Simulaciones con y sin prefijo cíclico:* En las simulaciones realizadas para escenarios LOS, se toma como ejemplo los resultados obtenidos para un arreglo 2x8 en escenario UMa-LOS (figuras 11, 12) en los que se puede observar que no existe influencia del prefijo cíclico en el proceso de comunicación puesto que al realizar convolución del canal con la señal a transmitir no existe afectación porque los taps del canal quedan en la primera componente sin agregar distorsiones adicionales que requieran esta característica (figura 9). En el caso de escenario NLOS a manera de ejemplo y, considerando que QPSK es un esquema más robusto que 64QAM para este caso, es posible notar que en las figuras 13 y 14 los taps de la respuesta del canal observados en la figura 10 introducen interferencias en la señal que hacen necesaria esta característica, aunque la respuesta del canal presenta alto desvanecimiento, con un prefijo cíclico de 150 definido en el documento 3GPP 38.901 [8] se observa una mejora notable. Teniendo en cuenta estos resultados y el propósito de este trabajo en FWA con escenarios LOS las simulaciones se realizarán sin prefijo cíclico.

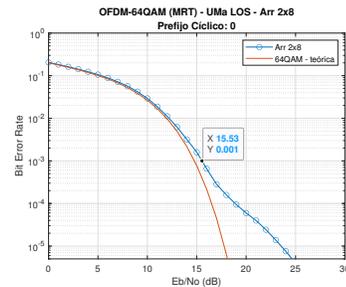


Fig. 11. Arreglo 2x8 UMa LOS sin prefijo cíclico.

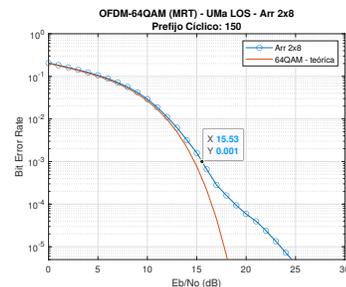


Fig. 12. Arreglo 2x8 UMa LOS con prefijo cíclico.

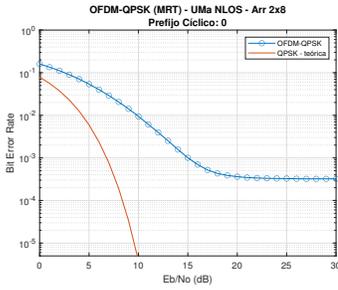


Fig. 13. Arreglo 2x8 UMa NLOS sin prefijo cíclico.

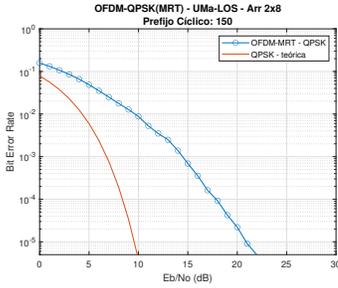


Fig. 14. Arreglo 2x8 UMa NLOS con prefijo cíclico.

C. Respuesta en Frecuencia

Usando la plataforma QuaDRiGa es posible generar diferentes tipos de canal, se generan en este trabajo las siguientes respuestas en frecuencia para los escenarios UMA-LOS (figura 15), y UMa-NLOs (figura 16) para un arreglo de antenas 2x8 en los que se observa la respuesta tipo flat-fading para el escenario UMa-LOS que al estar en un entorno de mayor densidad poblacional su respuesta conserva estas características teniendo en cuenta la altura de estación base (25 m) y distancia ISD de 500 m y UMa-NLOS con alto desvanecimiento ya que no es un escenario LOS.

Las figuras mostradas a continuación (figuras 15 y 16) corresponden a la respuesta en frecuencia de las antenas 5 y 6 en un arreglo 2x8.

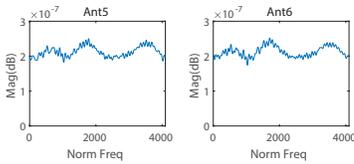


Fig. 15. Respuesta en frecuencia canal QuaDRiGa en arreglo 2x8 para escenario UMA LOS.

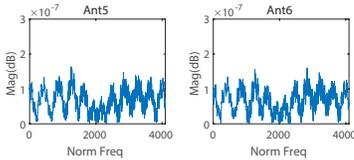


Fig. 16. Respuesta en frecuencia canal QuaDRiGa en arreglo 2x8 para escenario UMA NLOS.

IV. RESULTADOS

A. Precodificación MRT

Con el objeto de demostrar las ventajas de un sistema MISO, se realizaron diferentes simulaciones usando los formatos de modulación OFDM y SC-QAM sin aplicar y aplicando precodificación MRT a manera de ejemplo con arreglo de tamaño 4x4 en escenario UMA-LOS así como su respectiva penalidad en BER. El conocimiento del canal nos permite aplicar la técnica de MRT la cual nos permite mejorar considerablemente la ganancia del transmisor, reducir y neutralizar interferencias con un bajo costo computacional [22] [23]. Ahora bien, a medida que se aumenta la capacidad de los arreglos de antenas, la penalidad de BER disminuye considerablemente, especialmente en arreglos 4x4 y 2x8 y, son más evidentes para SC-QAM.

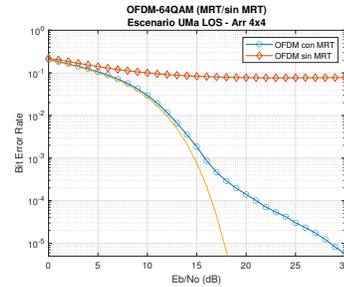


Fig. 17. Arreglo 4x4 OFDM-64QAM con y sin precodificación MRT.

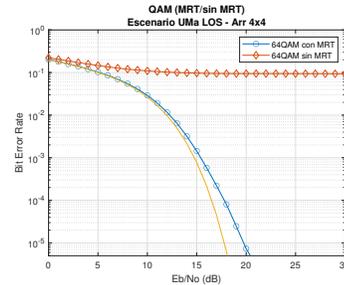


Fig. 18. Arreglo 4x4 64QAM con y sin precodificación MRT.

Para arreglos 4x4 (ver figuras 17 y 18) la penalidad con un BER de 10^{-3} de OFDM respecto a SC-QAM disminuye, sin embargo, para un BER de 10^{-4} se pueden observar valores de aproximadamente 3 dB, mientras que para 10^{-5} se observa una penalidad de aproximadamente 9 dB con lo cual el desempeño de SC-QAM es mucho mejor.

B. Órdenes de Modulación

De acuerdo con los resultados obtenidos, y, de acuerdo con la respuesta del canal QuaDRiGa [21] figuras: 15, 16 se puede confirmar que para el caso de UMa LOS (figuras 19 y 20) se observa un excelente desempeño para QPSK y para 16QAM en OFDM y SC-QAM, en el que se observa el comportamiento mencionado en la sección anterior respecto a valores altos de $E_b N_o$; sin embargo en órdenes superiores

como se mencionó anteriormente para valores de $E_b N_o$ altos el desempeño empieza a degradarse mucho más que en el caso anterior y de acuerdo con lo mencionado por [24] los órdenes altos de modulación a niveles de SNR altos sufren un incremento en el número de errores y por ende una afectación a su desempeño. Ahora bien, según la literatura [24], [25], [26], incrementar las tasas de datos nos permite tener mejores sistemas de comunicación, pero a un costo mayor en infraestructura y correcciones a las deficiencias presentadas en cuanto a errores de fase [27], obstáculos y otras fallas que se pueden presentar.

En los resultados obtenidos agregando ruido de fase se observa cómo al aumentar el orden de modulación se incrementa la penalidad de SNR y BER para valores de $E_b N_o$ altos tal como lo menciona [24] y, para OFDM este efecto es más notorio debido a que la afectación sobre la señal ocurre sobre portadoras y no sobre una sola como en el caso de SC-QAM es por eso que para el caso de UMa-LOS (figuras 21 y 22) en 64QAM y 256QAM la penalidad sobre la señal es más notoria respecto a lo que sufre SC-QAM que de acuerdo con las gráficas es cercana a 1 dB.

Parámetros de Simulación	
Arreglo de Antenas:	2x8
Esquemas de Modulación:	OFDM, SC-QAM
Orden de Modulación:	4,16,64,256
Prefijo Cíclico:	0
Escenarios Simulados:	UMa-LOS, RMa-LOS, UMa-NLOS

TABLA III
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN ÓRDENES DE MODULACIÓN

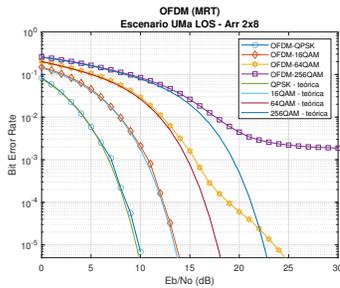


Fig. 19. Resultados de BER para diferentes órdenes de modulación OFDM en arreglo 2x8, escenario UMA-LOS.

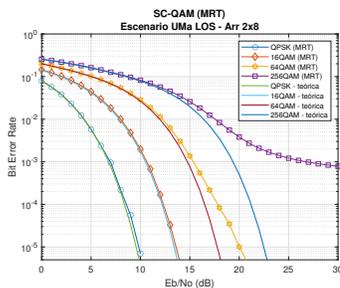


Fig. 20. Resultados de BER para diferentes órdenes de modulación QAM en arreglo 2x8, escenario UMA-LOS.

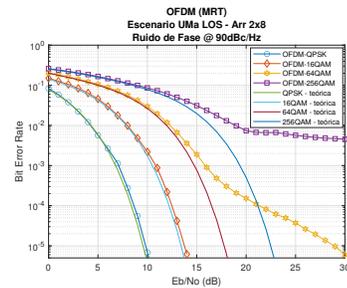


Fig. 21. Resultados de BER para diferentes órdenes de modulación OFDM en arreglo 2x8, escenario UMA-LOS con ruido de fase.

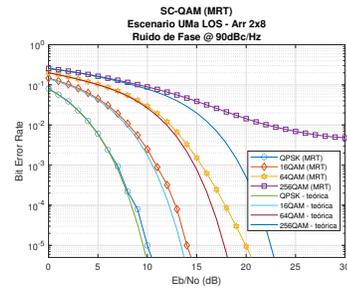


Fig. 22. Resultados de BER para diferentes órdenes de modulación QAM en arreglo 2x8, escenario UMA-LOS con ruido de fase.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para las secciones a continuación los resultados comparativos se tomarán con 64QAM y arreglo 2x8 para las comparaciones principales debido al mejor rendimiento respecto a otros órdenes de modulación y arreglos de antenas además de ser formatos comunes en implementaciones de FWA.

C. Afectación de Ruido de Fase

Una de las deficiencias más comunes de las comunicaciones es el ruido que se manifiesta de diferentes formas y por diferentes orígenes, uno de ellos PN originando grandes problemas de desempeño reflejados principalmente en interferencia entre portadoras (ICI) y rotación de la constelación [28] [29]. Este efecto fue simulado ajustando una varianza σ mostrada en la tabla IV para poder producir ruidos aleatorios controlados y garantizar un ruido de fase diferente para las señales de cada antena. Se obtienen resultados que nos indican cómo dependiendo del tipo de canal la afectación de las señales es distinta para caso, en UMa-LOS (figuras: 23, 24) se observa afectación muy cercana para el caso de OFDM y en SC-QAM una afectación no tan considerable en los casos de -110 dBc/Hz y -90 dBc/Hz. Los valores simulados de ruido de fase son de acuerdo con los rangos sugeridos en las discusiones R4-1703107 [30] y R4-1703528 [31] de 3GPP.

Parámetros de Simulación	
Arreglo de Antenas:	2x8
Esquemas de Modulación:	OFDM, SC-QAM
Orden de Modulación:	64
Prefijo Cíclico:	0
Ruido de Fase:	-110, -90, -75, -70 dBc/Hz
Desviación estándar para ruido de fase:	$\sigma = 2$
Offset:	10 KHz
Escenarios Simulados:	UMa-LOS, RMa-LOS, UMa-NLOS
Bit Error Rate analizado:	10^{-3}

TABLA IV

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN ELEMENTOS APAGADOS Y RUIDO DE FASE

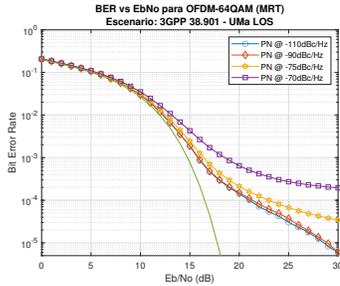


Fig. 23. Resultados de BER para OFDM64 en diferentes valores de ruido de fase en escenario UMa LOS.

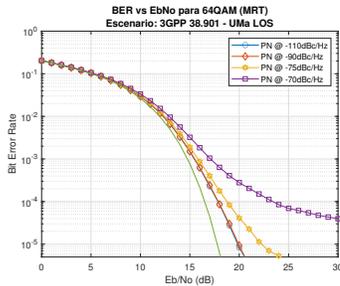


Fig. 24. Resultados de BER para 64QAM en diferentes valores de ruido de fase en escenario UMa LOS.

Para las figuras 23 y 24 en escenario UMa-LOS, la penalidad observada entre OFDM y SC-QAM empieza a incrementarse considerablemente para un BER de 10^{-4} donde se observa aproximadamente 3 dB y luego para un BER de 10^{-5} en aproximadamente 9 dB.

D. Elementos defectuosos de arreglo de antenas

En las simulaciones realizadas, y, para este caso en particular de acuerdo con lo mostrado para los escenarios UMa-LOS 15, y UMa-NLOS 16 generados por QuaDRiGa [21] (e.g. en RMa y en UMa la dispersión angular en dirección vertical es muy baja), se evidencia que la degradación de la señal es mayor cuando los elementos apagados se encuentran en la misma columna puesto que en este caso se pierde la contribución completa de una columna disminuyendo la diversidad del transmisor y por lo tanto disminuyendo su desempeño, mientras que para los casos donde los elementos apagados se encuentran en columnas diferentes la diversidad del transmisor se mantiene (sin embargo, con menor potencia por los elementos apagados) puesto que se tiene al menos un

elemento funcionando en cada columna. Lo anterior se debe a que al tener más columnas funcionando se puede aprovechar más la alta dispersión angular en dirección horizontal. De ahí la importancia de contar con arreglos de antenas con elementos y condiciones en su configuración que permitan incrementar la eficiencia de los sistemas de comunicaciones [32]. Como se puede observar en los resultados presentados la penalidad que sufre la señal para casos de $E_b N_o$ se incrementan considerablemente para OFDM, en los casos de las figuras 29 y 30 se observa sobre 10^{-5} una penalidad de aproximadamente 4 dB de OFDM respecto a SC-QAM donde el efecto es más notorio.

Parámetros de Simulación	
Arreglo de Antenas:	2x8
Elementos Apagados:	2,4
Esquemas de Modulación:	OFDM, SC-QAM
Orden de Modulación:	64
Prefijo Cíclico:	0
Ruido de Fase:	0 dBc/Hz
Escenarios Simulados:	UMa-LOS
Bit Error Rate analizado:	10^{-3}

TABLA V

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN ELEMENTOS APAGADOS

E. 2 Elementos apagados en columnas diferentes

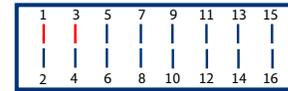


Fig. 25. Arreglo de antenas 2x8 con 2 elementos apagados en columnas diferentes.

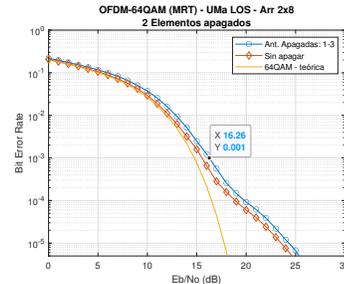


Fig. 26. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados OFDM.

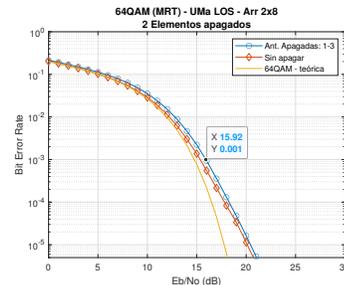


Fig. 27. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados QAM.

En las figuras 26 y 27 es posible observar que la penalidad sobre un BER de 10^{-3} existe una diferencia de 0.34 dB de OFDM respecto a SC-QAM, la cual empieza a ser más evidente desde 10^{-4} , dándonos un mejor desempeño de SC-QAM para valores altos de $E_b N_o$.

F. 2 Elementos apagados en la misma columna

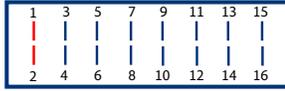


Fig. 28. Arreglo de antenas 2x8 con 2 elementos apagados en la misma columna.

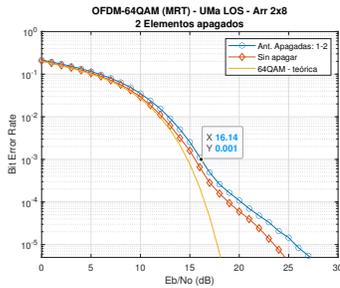


Fig. 29. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados OFDM.

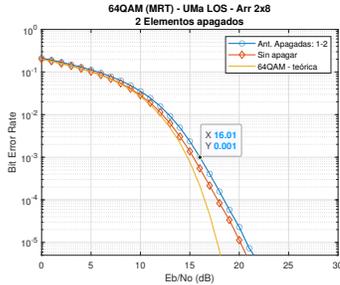


Fig. 30. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados QAM.

Al apagar elementos de la misma columna el rendimiento empieza a disminuir y, para las figuras 29 y 30 para un BER de 10^{-3} se observa una diferencia de 0.13 dB entre OFDM y SC-QAM, a pesar de tener un valor menor en esta referencia (BER de 10^{-3}) respecto al caso anterior, sobre valores $E_b N_o$ superiores el enlace empieza a degradarse mucho más.

G. 4 Elementos apagados en columnas diferentes

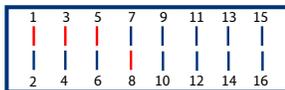


Fig. 31. Arreglo de antenas 2x8 con 4 elementos apagados en columnas diferentes.

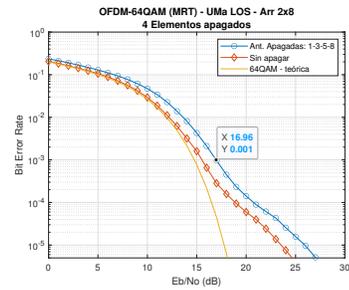


Fig. 32. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados OFDM.

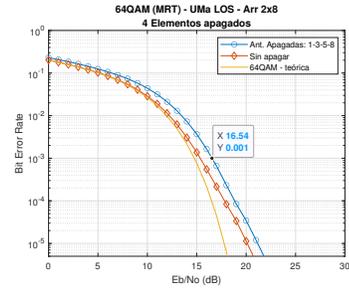


Fig. 33. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados QAM.

Como se ha mostrado en los casos anteriores, para las figuras 32 y 33, al apagar más elementos en columnas diferentes, en primer lugar, se observa una penalidad de 0.7 dB para OFDM con respecto a la figura 26, y 0.62 dB en SC-QAM respecto a la figura 27 y una diferencia de 0.42 dB de OFDM respecto a SC-QAM para un BER de 10^{-3} .

H. 4 Elementos apagados en la misma columna

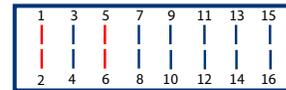


Fig. 34. Arreglo de antenas 2x8 con 4 elementos apagados en la misma columna.

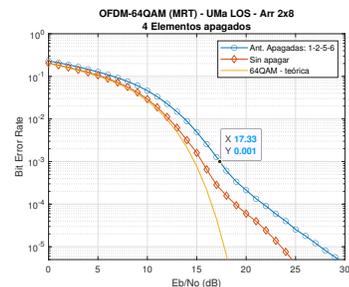


Fig. 35. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados OFDM.

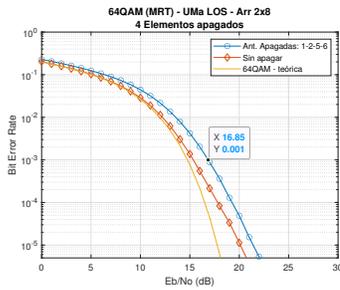


Fig. 36. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados QAM.

En los resultados de las figuras 35 y 36 se observa una penalidad de 1.19 dB para OFDM con respecto a la figura 29 y 0.84 dB en SC-QAM respecto a la figura 30 y una diferencia de 0.48 dB de OFDM respecto a SC-QAM para un BER de 10^{-3} .

V. EFECTO DE RUIDO DE FASE CON ELEMENTOS APAGADOS

En los siguientes resultados, se aplica ruido de fase para incrementar la degradación del sistema con lo cual es mucho más evidente cómo el número y posición de elementos apagados respecto a lo anteriormente dicho, pues existe un BER mayor en los elementos apagados en la misma columna. Adicional a esto es claro notar cómo SC-QAM presenta mayor y mejor rendimiento respecto a OFDM.

Parámetros de Simulación	
Arreglo de Antenas:	2x8
Elementos Apagados:	2,4
Esquemas de Modulación:	OFDM, SC-QAM
Orden de Modulación:	64
Prefijo Cíclico:	0
Ruido de Fase:	-110, -90, -75, -70 dBc/Hz
Desviación estándar para ruido de fase	$\sigma = 2$
Offset:	10 KHz
Escenarios Simulados:	UMa-LOS
Bit Error Rate analizado:	10^{-3}

TABLA VI

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN ELEMENTOS APAGADOS Y RUIDO DE FASE

A. 2 Elementos apagados en columnas diferentes

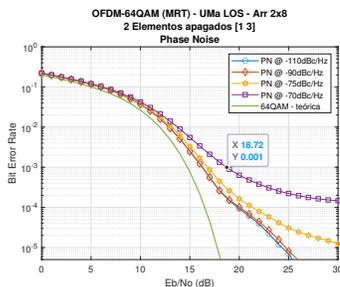


Fig. 37. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados OFDM.

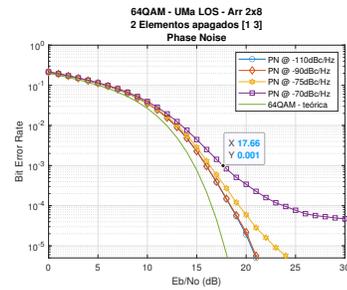


Fig. 38. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados QAM.

Sobre los resultados obtenidos en las figuras 37 y 38, en el caso de peor ruido de fase simulado para este trabajo -70 dBc/Hz se observa una diferencia de 1.06 dB y, una penalidad más notoria sobre valores altos de E_bN_o para el caso de OFDM en un BER de 10^{-3} .

B. 2 Elementos apagados en la misma columna

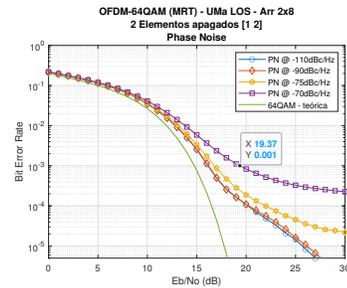


Fig. 39. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados OFDM.

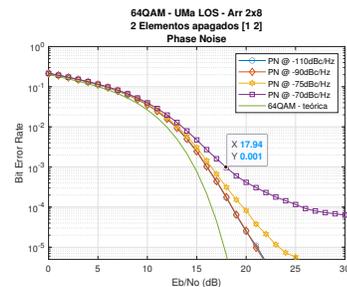


Fig. 40. Arreglo 2x8 con 2 elementos apagados QAM.

Como se ha mencionado en resultados anteriores de elementos apagados se puede observar cómo al apagar elementos de la antena en la misma columna, el rendimiento empieza a degradarse, que para las figuras 39 y 40 se obtiene una diferencia de 1.43 dB de OFDM respecto a SC-QAM en un BER de 10^{-3} .

C. 4 Elementos apagados en columnas diferentes

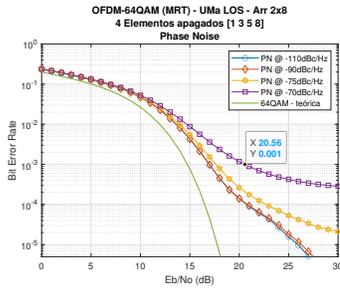


Fig. 41. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados OFDM.

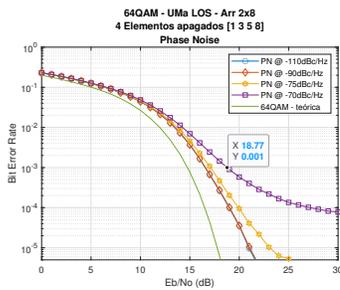


Fig. 42. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados QAM.

En las figuras 41 y 42 Se evidencia una diferencia mucho más grande de OFDM respecto a SC-QAM para un BER de 10^{-3} de 1.77 dB.

D. 4 Elementos apagados en la misma columna

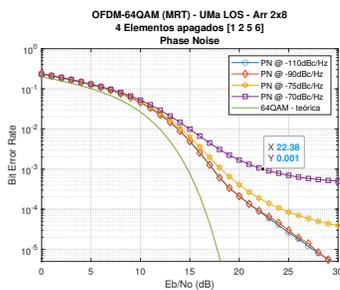


Fig. 43. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados OFDM.

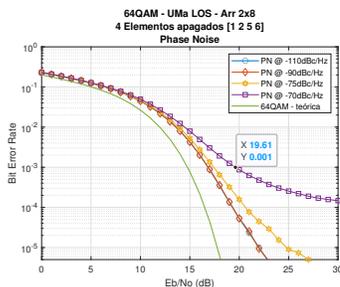


Fig. 44. Arreglo 2x8 con 4 elementos apagados QAM.

Siendo este el peor caso analizado con 4 elementos apagados en la misma columna (figuras 43 y 44), se evidencia una degradación más considerable del enlace y desde luego la diferencia de OFDM respecto a SC-QAM mucho más grande que en el caso anterior, siendo esta de 2.77 dB para un BER de 10^{-3} .

VI. CONCLUSIONES

- La integración de funciones y componentes de simulación de la plataforma generada para este trabajo permitió separar y analizar los efectos y desempeño de cada uno de estos en los esquemas de modulación QAM y OFDM generando resultados óptimos para realizar las comparaciones en un escenario uno a uno bajo las diferentes condiciones de este trabajo.
- Los resultados obtenidos para MRT en enlaces FWA evidencian una mejora notable de las señales transmitidas bajo diferentes esquemas de modulación, arreglos de antena en el transmisor y efectos causados por ruido de fase o afectación en los elementos de transmisión que se reflejan en un buen desempeño particularmente para QAM en condiciones de conocimiento pleno del canal que no se da en su totalidad en condiciones reales.
- Para escenarios FWA (UMa-LOS) es evidente la necesidad de contar con arreglos de antenas horizontales en los cuales se incremente el número de columnas para aprovechar mejor la diversidad en el transmisor y así lograr mejor cobertura y desempeño del enlace.
- Aunque OFDM es un esquema robusto que ofrece alta eficiencia, la reducción de PAPR constituye un reto de aplicación de diferentes técnicas que pueden complejizar su estructura [33]. En los resultados obtenidos para SC-QAM se evidencia que tiene un PAPR menor que OFDM por tanto, se reduce la exigencia de amplificadores de señal. Ahora bien, bajo las condiciones analizadas para escenarios LOS en este trabajo, entre los dos esquemas de modulación analizados, SC-QAM es un esquema más robusto frente a desvanecimiento del canal debido a que su afectación es diferente a OFDM y a QAM, a ruido de fase y al apagado de elementos del arreglo de antenas con penalizaciones entre 0.13 dB y 3 dB que no afectan de forma considerable su desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Ericsson, "The Ericsson Mobility Report," 2017.
- 2 Cisco, "Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014," *White Paper, CISCO Systems Inc*, vol. 9, pp. 1–34, 2010.
- 3 Ranaweera, C., Wong, E., Nirmalathas, A., Jayasundara, C., and Lim, C., "5G C-RAN architecture: A comparison of multiple optical fronthaul networks," *2017 21st International Conference on Optical Network Design and Modeling, ONDM 2017 - Conference Proceedings*, 2017.
- 4 SAMSUNG, "5G Fixed Wireless Access - White Paper," Tech. Rep., 2018.
- 5 Ericsson, "Advanced Antenna Systems for 5G Networks," *White Paper, Ericsson*, no. November, 2018. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>
- 6 Zaidi, A., Athley, F., Medbo, J., Gustavsson, U., Durisi, G., and Chen, X., *5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components*. Elsevier Science, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=mtJKDwAAQBAJ>

- 7 Ericsson, *Fixed Wireless Access - Handbook*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/network-solutions/fixed-wireless-access>
- 8 European Telecommunications Standards Institute, "Technical Report 5G; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14)," *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, vol. 0, 2017.
- 9 NJIT Center for Wireless Communications and Signal Processing and Radio, S. D., "Software Defined Radio - Lab4: Pulse shaping and matched filtering," 2013. [Online]. Available: <http://ecelabs.njit.edu/sdr/index.php>
- 10 "mmwave massive mimo," in *mmWave Massive MIMO*, Mumtaz, S., Rodriguez, J., and Dai, L., Eds. Academic Press, 2017, pp. 343 – 351. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128044186099921>
- 11 Otterstein Bolós, P., "OFDM smart beamforming," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/123511>
- 12 Roupael, T. J., "Chapter 3 - common digital modulation methods," in *RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio*, Roupael, T. J., Ed. Burlington: Newnes, 2009, pp. 25 – 85. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750682107000035>
- 13 TECHNOLOGIES, B., "Ultimate Guide to Understanding Phase Noise," 2020. [Online]. Available: <https://blog.bliley.com/ultimate-guide-to-phase-noise>
- 14 ELECTRONICS-NOTES, "What is Phase Noise: phase jitter," 2020. [Online]. Available: https://www.electronics-notes.com/articles/basic{_} concepts/electronic-rf-noise/phase-noise-jitter-what-is.php
- 15 Analog-Devices-Inc and Kester, W., "Converting Oscillator Phase Noise to Time Jitter," 2009. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-008.pdf>
- 16 de Cantabria, G.-U. and Santamaría, I., "Fading Channels: Capacity, BER and Diversity," Universidad de Cantabria, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://gtas.unican.es/files/docencia/TAC/apuntes/analysisfadingchannelswp.pdf>
- 17 European Telecommunications Standards Institute, "Tr 38.101-2:user equipment (ue) radio transmission and reception (release 15)," *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, 2019.
- 18 —, "Tr 38.104:base station (bs) radio transmission and reception (release 15)," *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, 2019.
- 19 Station, B., "radio transmission and reception (release 15), 3 gpp technical specification group radio access network; nr, ts 38.104, v15. 2.0, jul. 2018," 2018.
- 20 Analog-Devices-Inc, "AD9172 DAC." [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9172.pdf>
- 21 Jaeckel, S., Raschkowski, K., Börner, K., Thiele, L., Burkhardt, F., and Eberlein, E., "Quadrige-quasi deterministic radio channel generator, user manual and documentation, fraunhofer heinrich hertz institute," Tech. Rep. v2.2.0, Tech. Rep., 2019.
- 22 Korde, M. and Bodade, R. M., "BER and Capacity Improvement for Multiuser MIMO System by MRT Precoding Technique," *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 1, pp. 581–590, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06419-6>
- 23 Zhang, Y., Gao, J., and Liu, Y., "MRT precoding in downlink multi-user MIMO systems," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, 2016.
- 24 "Transmission Performance of an OFDM-Based Higher-Order Modulation Scheme in Multipath Fading Channels," 2019.
- 25 Ii, L. R., Sujaee, K., and George, R., "The performance of high order modulation QAM-OFDM in the presence mutipath fading channels ." pp. 15–17, 2012.
- 26 Hueber, G. and Niknejad, A. M., *Millimeter-Wave Circuits for 5G and Radar*, ser. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series. Cambridge University Press, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=mXGSDwAAQBAJ>
- 27 Wu, S. and Bar-Ness, Y., "OFDM systems in the presence of phase noise: Consequences and solutions," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 11, pp. 1988–1996, 2004.
- 28 Armada, A. G., "Understanding the effects of phase noise in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 47, no. 2, pp. 153–159, 2001.
- 29 Pitarokoilis, A., Member, S., Björnson, E., and Larsson, E. G., "Performance of the Massive MIMO Uplink With OFDM and Phase Noise," vol. 20, no. 8, pp. 1595–1598, 2016.
- 30 3GPP and Qualcomm-Incorporated, "R4-1703107 - On Phase noise model for NR," 2017.
- 31 3GPP and Huawei-Hisilicon, "R4-1703528 - Phase noise model for above 6 GHz," 2017.
- 32 Heiskala, J. and Terry, J., *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*. USA: Sams, 2001.
- 33 Paredes, M. C. P. and García, M. J. F.-G., "The Problem of Peak-to-Average Power Ratio in OFDM Systems," pp. 1–8, 2015. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1503.08271>